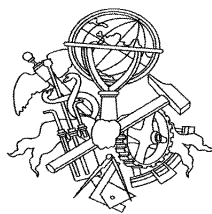


# ANÁLISE DE RISCO EM SEQUENCIAMENTO DE ACTIVIDADES COM RESTRICÇÕES DE RECURSOS

Tiago Filipe Vaz Leite



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial  
Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

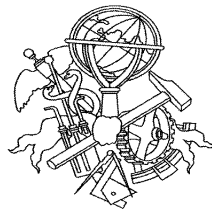


Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Sistemas e Planeamento Industrial

Candidato: Tiago Filipe Vaz Leite, N° 1040176, [1040176@isep.ipp.pt](mailto:1040176@isep.ipp.pt)

Orientação científica: Ana Maria Marques de Moura Gomes Viana, [agv@isep.ipp.pt](mailto:agv@isep.ipp.pt)

Supervisão: Ana Maria Marques de Moura Gomes Viana, [agv@isep.ipp.pt](mailto:agv@isep.ipp.pt)



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

7 de Dezembro de 2009



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer, primeiramente, à Professora Doutora Ana Viana, orientadora desta tese, pelo incomensurável empenho e dedicação que pôs ao dispor deste trabalho. Na prossecução desta tese sempre demonstrou enorme solidariedade e compreensão pelas dúvidas por mim levantadas e disponibilizou de forma permanente todo o seu auxílio. Certamente não teria sido possível desenvolver este tipo de trabalho nos prazos impostos sem o seu profundo conhecimento nas matérias abordadas. Estou-lhe extremamente grato.

Agraciar, também, o Engenheiro Luís Guardão pela sua disponibilidade e pelo profissionalismo demonstrado. Sendo o responsável pelo escalonador utilizado neste trabalho, contribuiu para que a tese pudesse explorar uma vertente prática.

Agradeço, por fim, às pessoas que me são mais próximas, pelo apoio incondicional sempre dedicado, de modo especial à minha mãe.



## *Resumo*

Esta dissertação versa sobre a análise de risco presente em problemas de sequenciamento de actividades com restrição de recursos, em particular em contextos multi-projecto.

O problema consiste no sequenciamento de dois ou mais projectos, que partilham recursos limitados. Referem-se os tipos de problemas de escalonamento de projectos existentes, quer na versão multi-projecto quer de um só projecto, e faz-se uma apresentação breve dos métodos de resolução propostos na literatura, quer para abordagens exactas, quer não-exactas, podendo-se constatar que abordagens multi-projecto são pouco comuns.

Destaca-se ainda a importância da gestão do risco nos projectos e referem-se os conceitos principais que lhes estão associados, bem como de processos e ferramentas comumente utilizadas na monitorização e mitigação dos factores de risco.

Os factores de risco podem afectar as actividades presentes nos projectos, as suas durações, os custos envolvidos, os recursos afectados e até mesmo a sua viabilidade.

Neste trabalho são propostas medidas de risco que têm em conta a potencial alteração da duração de actividades de projectos. O cálculo do nível de criticidade de cada projecto terá em conta as folgas existentes em cada actividade e os índices de criticidade das actividades.

A abordagem proposta é exemplificada num pequeno problema com dois projectos concorrentes. Para diferentes soluções do mesmo problema, fornecidas por um software de escalonamento (Izaro Grey), são calculados e discutidos os níveis de risco atingidos por cada escalonamento.

## *Palavras-Chave*

Análise de risco, escalonamento de actividades, escalonamento multi-projecto com restrições de recursos





## *Abstract*

This dissertation discusses the presence of risk in resource constrained project scheduling problem (RCPSP). Special emphasis is given to multi-project problems - the problem of scheduling two or more projects that share limited resources.

A reference is made to different types of scheduling problems, in their multi-project and single-project versions. A brief presentation of the main resolution methods proposed in the literature, both exact and non-exact approaches, is also made. The literature review shows that the multi-project variants are seldom studied.

The importance of risk management in projects is highlighted and the key concepts associated with it are addressed. The processes and tools commonly used to monitor and mitigate risks are also discussed.

Risk can affect the activities in the projects: their duration, their costs, the resources they need and even their viability. In this document functions that take into account the possible changes in the duration of projects activities are proposed for risk evaluation. The criticality level of each project is calculated taking into account the slack of each activity and its criticality rate. The approach is exemplified in a small problem with two competing projects. For different solutions of the same problem, provided by the scheduling software (Izaro Grey), the risk levels achieved by each solution are calculated and discussed.

## ***Keywords***

Risk analysis, activities scheduling, resource constrained multi-project scheduling problem



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO .....	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE.....	3
<b>2. SEQUENCIAMENTO DE ACTIVIDADES COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. O RCPSP E SUAS VARIANTES .....	8
2.2. TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO.....	13
2.2.1. <i>Algoritmos Exactos</i> .....	14
2.2.2. <i>Heurísticas</i> .....	14
<i>Heurísticas construtivas</i> .....	15
<i>Heurísticas de melhoramento (Meta-heurísticas)</i> .....	17
a. <i>Pesquisa Tabu</i> .....	18
b. <i>GRASP</i> .....	19
c. <i>Algoritmos Genéticos e algoritmos meméticos</i> .....	20
<i>Heurísticas híbridas</i> .....	22
2.3. ESTADO DA ARTE .....	24
2.3.1. <i>Algoritmos Exactos</i> .....	24
2.3.2. <i>Regras de prioridade</i> .....	24
2.3.3. <i>Meta-heurísticas</i> .....	25
2.4. SOFTWARE COMERCIAL DE GESTÃO DE PROJECTOS.....	27
2.4.1. <i>Multi-Project Planner</i> .....	27
2.4.2. <i>RationalPlan Multi Project</i> .....	28
2.4.3. <i>GanttProject</i> .....	30
2.4.4. <i>dotProject</i> .....	30
2.4.5. <i>Comparação entre softwares de escalonamento de gestão de projectos</i> .....	31
<b>3. RISCO NO SEQUENCIAMENTO DE ACTIVIDADES COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS</b>	<b>33</b>
3.1. ESTADO DA ARTE.....	42

3.2.	SOFTWARE COMERCIAL DE ANÁLISE DE RISCO EM GESTÃO DE PROJECTOS .....	43
3.2.1.	<i>Microsoft Project 2007</i> .....	43
3.2.2.	<i>Primavera PertMaster</i> .....	46
3.2.3.	<i>Comparação entre softwares de análise de risco em gestão de projectos</i> .....	47
<b>4.</b>	<b>ABORDAGEM PROPOSTA .....</b>	<b>49</b>
4.1.	PROCEDIMENTO.....	49
4.1.1.	<i>Cálculo do nível de risco dos projectos</i> .....	52
4.2.	IMPLEMENTAÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA .....	55
4.3.	EXEMPLIFICAÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA .....	57
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>67</b>
5.1.	CONCLUSÕES.....	67
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	69
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>71</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1	Exemplo de WBS .....	6
Figura 2	Exemplo de um grafo .....	6
Figura 3	Diagrama de Gantt .....	7
Figura 4	Diagrama de Gantt modificado .....	8
Figura 5	Tipos de Problemas .....	13
Figura 6	Tipos de Meta-heurísticas .....	18
Figura 7	Cruzamento de cromossomas .....	21
Figura 8	Mutação num cromossoma .....	21
Figura 9	Recombinação, mutação e pesquisa local em algoritmos meméticos .....	22
Figura 10	Esquema de relacionamento de algoritmos .....	23
Figura 11	Vista do software RationalPlan Multi Project .....	29
Figura 12	Matriz Probabilidade/Impacto .....	35
Figura 13	Visão do MS Project 2007 .....	44
Figura 14	Visão do Primavera PertMaster .....	46
Figura 15	Exemplo de dados XML .....	51
Figura 16	Matriz probabilidade/impacto .....	53
Figura 17	Passos para o cálculo do nível de risco .....	55
Figura 18	<i>Layout</i> do ficheiro Excel .....	56
Figura 19	Grafo do projecto 1 .....	57
Figura 20	Grafo do projecto 2 .....	57
Figura 21	Diagramas de Gantt .....	60
Figura 22	Resultados do escalonamento A e B .....	61
Figura 23	Janela da matriz probabilidade/impacto .....	62
Figura 24	Índices de criticidade considerados .....	62
Figura 25	<i>Layout</i> do ficheiro Excel após o cálculo dos níveis de risco .....	63
Figura 26	Níveis de risco dos projectos em ambos os escalonamentos .....	65



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Comparação de algumas características entre softwares de escalonamento de gestão de projectos .....	31
Tabela 2	Matriz de Actividades e Factores de risco.....	40
Tabela 3	Comparação de algumas características entre softwares de escalonamento e risco.....	47
Tabela 4	Dados dos projectos .....	58
Tabela 5	Níveis de risco dos escalonamentos com diferentes pesos.....	63
Tabela 6	Níveis de risco dos escalonamentos com diferentes combinações de resultados.....	64





## *Acrónimos*

AG	–	Algoritmos Genéticos
AM	–	Algoritmos Meméticos
CPM	–	<i>Critical Path Method</i>
FCFS	–	<i>First Come First Served</i>
GRASP	–	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
HTML	–	<i>HyperText Markup Language</i>
LRC	–	Lista Restrita de Candidatos
MAXTWK	–	<i>Maximum Total Work Content</i>
MINLFT	–	<i>Minimum Latest Finish Time</i>
MINSLK	–	<i>Minimum Slack First</i>
MRCPSP	–	<i>Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem</i>
MRCMPSP		<i>Multi-Mode Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem</i>
PERT	–	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
PDF	–	<i>Portable Document Format</i>
PSP	–	<i>Project Scheduling Problem</i>
RCPSP	–	<i>Resource Constrained Project Scheduling Problem</i>
RCMPSP	–	<i>Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem</i>
RN	–	Redes Neurais

SASP	– <i>Shortest Activity From The Shortest Project</i>
SGS	– <i>Schedule Generation Scheme</i>
VB	– <i>Visual Basic</i>
VND	– <i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	– <i>Variable Neighborhood Search</i>
WBS	– <i>Work Breakdown Structure</i>
XML	– <i>eXtensible Markup Language</i>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A gestão de projectos é uma actividade essencial no seio de organizações devido à necessidade crescente de racionalização dos processos de gestão. A dimensão dos projectos, assim como a complexidade do problema de decisão associado levam a que, actualmente, uma gestão efectiva de projectos só seja realizada com o apoio de ferramentas informáticas adequadas, grande parte delas tendo ainda como base o Método de Caminho Crítico (CPM, em inglês *Critical Path Method*) proposto nos anos 50 do século passado. O CPM assume que os recursos existentes são ilimitados e escalona as actividades constituintes de um projecto a partir das datas de início mais cedo/mais tarde de cada actividade, com o objectivo de minimizar a data de conclusão de projecto. Contudo, na prática, a esmagadora maioria dos projectos apresenta limitações de recursos e incerteza dos dados. Em muitos casos (se não em todos) pode-se estimar a duração das actividades, os recursos utilizados e os custos envolvidos sempre com um grau de incerteza associado. Para estes problemas, ditos estocásticos ou probabilísticos, o escalonamento de actividades torna-se mais complicado. Uma ferramenta que admite incerteza quanto à duração das actividades, mas que continua a considerar que os recursos não são um factor restritivo, é a análise técnica de revisão e avaliação de programa (PERT). Esta análise ao invés de apresentar uma estimativa de duração para cada actividade, apresenta três – um cenário

optimista, outro mais provável e um outro pessimista. Deste modo é possível incorporar o factor da incerteza na duração das actividades (impossível no CPM) e obter uma calendarização do projecto baseada em probabilidades.

Assim que as restrições de recursos são adicionadas ao problema a sua complexidade computacional passa a ser elevada, requerendo outras técnicas de resolução. O problema em questão é referido na literatura por Problema de Sequenciamento de Actividades com Restrições de Recursos (RCPSP, do inglês *Resource Constrained Project Scheduling Problem*).

Foi demonstrado por Blazewicz et al. [1] que o RCPSP é uma generalização do problema clássico do *Job shop* o qual pertence à classe de problemas do tipo NP-difícil (em inglês *NP-hard*), justificando assim o indispensável recurso a procedimentos baseados em heurísticas para a resolução de problemas de dimensão real em tempo útil.

Uma extensão ao RCPSP é o escalonamento multi-projecto denominado de Problema de Sequenciamento Multi-Projecto com Restrição de Recursos (RCMPSP, do inglês *Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem*) que, naturalmente é também considerado um problema NP-difícil. Nestes problemas, além de existirem actividades a competir por recursos, existem também projectos (mais ou menos autónomos) a competir entre si por um ou mais recursos. Um exemplo deste tipo de problema pode ser encontrado na construção civil. Suponha-se que existem dois projectos distintos, cada qual com as suas actividades (tarefas) e com os recursos de que necessitam bem definidos. Se actividades de ambos os projectos necessitarem do mesmo tipo de recursos e se o número disponível desses recursos for insuficiente para atender em simultâneo todas as actividades que deles necessitem, tem de se decidir qual dos projectos terá prioridade na recepção de recursos. Está-se portanto perante um problema RCMPSP. O problema é tão mais complexo quanto maior for o número de projectos, de actividades, de relações de precedência e de recursos.

A dificuldade dos problemas referidos é um factor limitativo na escolha do algoritmo de optimização a usar, sendo que algoritmos exactos não são eficientes na obtenção de soluções. Por isso mesmo, tem-se enveredado por algoritmos heurísticos construtivos e/ou meta-heurísticas quando se pretende resolver problemas de maior dimensão.

O número de abordagens distintas propostas na literatura, em particular na gestão de um único projecto, é elevado. No entanto, para multi-projecto, o número de abordagens proposto é significativamente menor.

A análise dos factores de risco presentes nas actividades e nos projectos é uma parte contida na gestão de projectos. Verifica-se, contudo, que a avaliação do risco associado a uma proposta de solução tem sido pouco estudado.

A avaliação de risco tem em conta factores de risco que possam ser prejudiciais aos projectos. Esses factores podem influir significativamente no sequenciamento das actividades e no tipo de recursos a utilizar por cada uma. Assim, entende-se que a análise do risco de uma solução seria uma importante fonte de informação para o agente de decisão. Se bem que o tema seja relevante, constatou-se que existem poucas publicações que abordem o risco em problemas de sequenciamento de actividades com restrições de recursos. Estes factores motivaram a realização deste trabalho: análise de risco em problemas de sequenciamento com restrições de recursos, em particular na sua vertente multi-projecto.

## **1.2. ESTRUTURA DA TESE**

A presente tese é composta por cinco capítulos. No capítulo 1, que aqui termina, é feita uma breve contextualização do trabalho.

No capítulo 2 são referidos vários problemas de sequenciamento de actividades. É feita uma revisão de literatura relativa ao escalonamento de tarefas, aos métodos de resolução existentes e a softwares comerciais de gestão de projectos.

No 3º capítulo são apresentados os aspectos mais importantes relacionados com o risco. São analisadas as definições de factor de risco, probabilidade da sua ocorrência, impacto provocado e prevenção e mitigação do efeito dos factores de risco. Analisam-se duas ferramentas informáticas de escalonamento de actividades que abordam a vertente análise de risco.

No capítulo 4 é proposta uma nova abordagem para avaliação de risco de soluções de problemas de escalonamento com restrições de recursos. São ainda descritos os procedimentos adoptados na realização dos testes computacionais feitos para validação da abordagem proposta. Tal abordagem é usada na avaliação de um conjunto de soluções

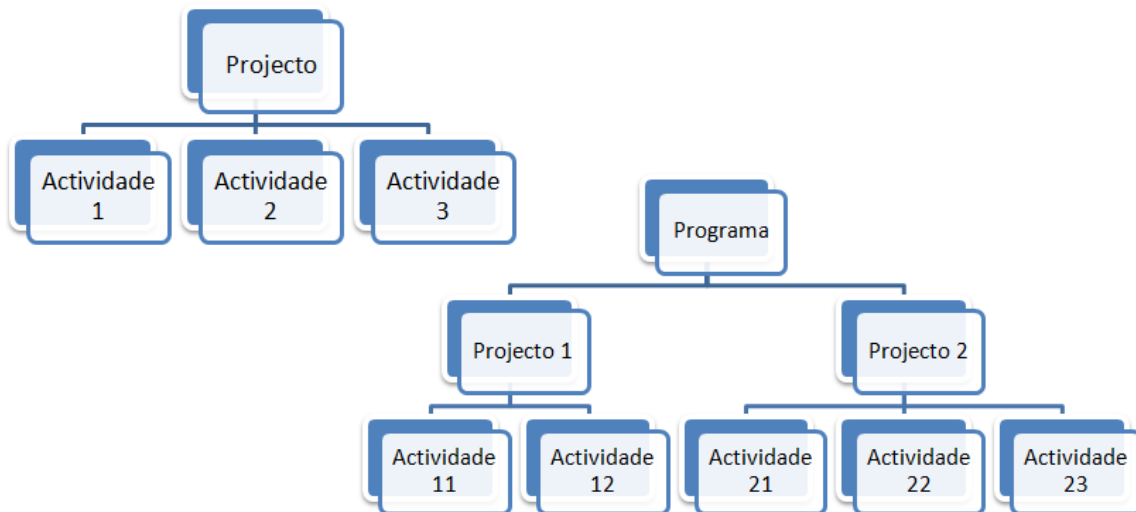
propostas pelo software de escalonamento Izaro Grey e os resultados obtidos são discutidos.

No 5º e último capítulo são apresentadas as conclusões a tirar deste trabalho e os desenvolvimentos futuros que podem advir do mesmo.

## 2. SEQUENCIAMENTO DE ACTIVIDADES COM RESTRIÇÕES DE RECURSOS

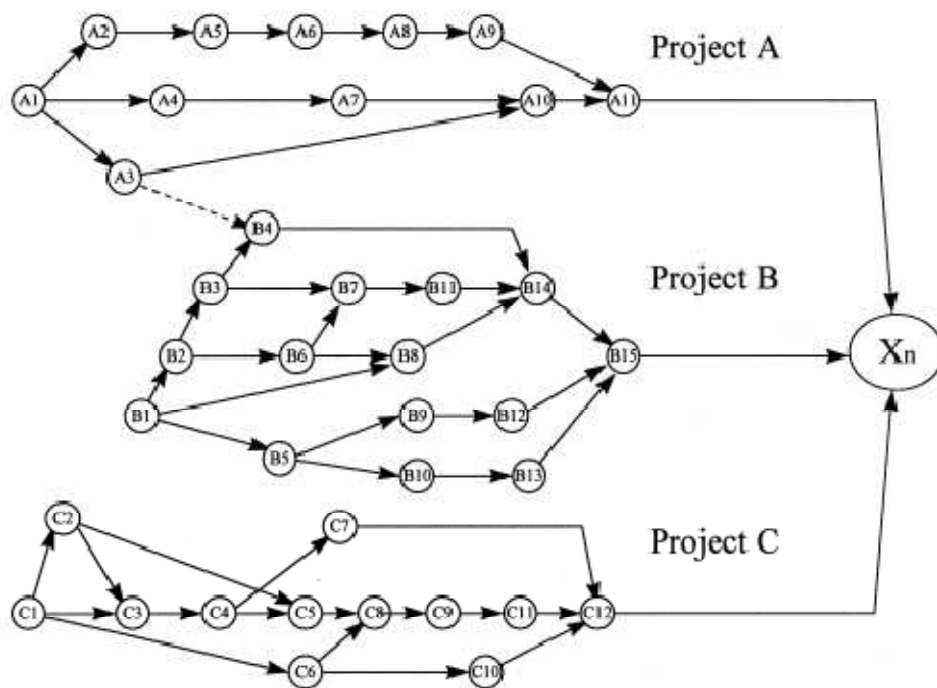
É usual decompor os projectos em parcelas mais pequenas de modo a que as equipas de trabalho se concentrem em actividades específicas em vez do projecto como um todo. Essa simplificação tem o nome de *Work Breakdown Structure* (WBS, Estrutura de Divisão do Trabalho). O WBS subdivide o trabalho do projecto em partes menores, em que cada nível descendente da WBS representa uma definição cada vez mais detalhada do trabalho do projecto, conforme representado na figura 1. Tal como um programa é constituído por diversos projectos, um projecto pode ser decomposto em várias actividades. É mais fácil e menos erróneo estimar as durações, recursos necessários e os custos envolvidos bem como monitorar e controlar o desenrolar do trabalho planeado em actividades concisas do que em projectos longos [2].

É comum representarem-se as relações de precedência e sequência entre actividades por meio de redes ou grafos, tal como é representado na figura 2 [3].



**Figura 1 Exemplo de WBS**

Este tipo de representação está presente na grande maioria dos softwares que procedem ao escalonamento de actividades. Entre elas encontram-se o Método do Caminho Crítico (CPM) e a análise técnica de revisão e avaliação de programa (PERT).



**Figura 2 Exemplo de um grafo**

O CPM escala as actividades com base nas suas durações e nas suas relações de precedência. Depois de estabelecidas as relações de precedências entre todas as actividades e somadas as durações das actividades, consoante o caminho a que pertençam, o CPM



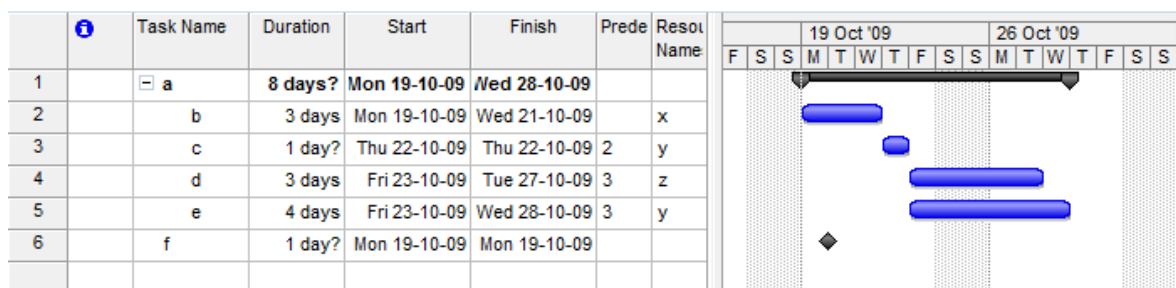
determina o caminho de maior duração entre a primeira e a última actividade, respeitando a ordem de precedência estabelecida entre elas. Define-se como caminho crítico aquele que necessitar de mais tempo para chegar do primeiro nó (de início do projecto) ao último nó (de conclusão do projecto). Diz-se caminho crítico porque as actividades a ele pertencentes não se podem atrasar sob pena de atrasarem o projecto inteiro, enquanto as actividades não pertencentes a tal caminho têm uma margem (uma folga) que permite atrasos dentro de certos limites.

Convém salientar que o escalonamento feito pelo CPM assume que os recursos necessários são ilimitados, quando na realidade, na maioria das vezes, os recursos são um factor restritivo, com limites estabelecidos.

A análise PERT é semelhante ao método CPM. A grande diferença entre ambos é o facto da análise PERT introduzir a componente incerteza em cada actividade. Não apresenta uma estimativa única de duração para cada actividade, mas sim três cenários – um optimista, um mais provável e um pessimista. Contrariamente ao CPM, é possível incorporar o factor da incerteza na duração das actividades e obter um cronograma do projecto baseado em probabilidades [4].

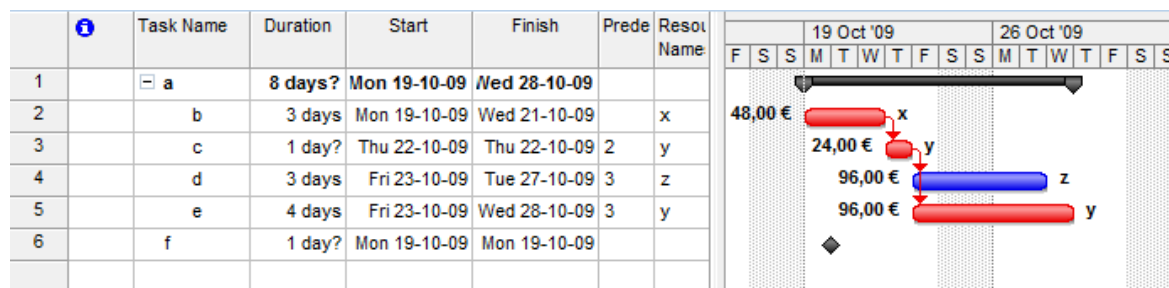
Numa rede PERT não existe um caminho crítico dado que todos os caminhos têm uma probabilidade de serem críticos de acordo com o cenário e a duração assumida pelas actividades.

Uma forma visualmente apelativa de representação de um sequenciamento é através de diagramas de Gantt (ver figura 3). Estes diagramas contêm tantas barras horizontais quantas as actividades existentes. Cada barra indica a data de início e término de cada actividade, bem como as durações esperadas para as mesmas. Os gráficos de barras são relativamente fáceis de ler e são frequentemente usados na gestão de projectos como controlo do trabalho efectuado e por desenvolver.



**Figura 3 Diagrama de Gantt**

O diagrama de Gantt original foi melhorado com novas características dando origem ao diagrama de Gantt modificado (ver figura 4). O diagrama de Gantt modificado possui todas as características do diagrama de Gantt original e, adicionalmente, inclui as relações de precedência entre as actividades, exhibe o caminho crítico e apresenta os recursos necessários à prossecução das actividades e seus custos [5].



**Figura 4 Diagrama de Gantt modificado**

Todas estas ferramentas e formas de representação contribuem para a resolução do problema de sequenciamento de actividades com restrições de recursos (RCPSP).

## 2.1. O RCPSP E SUAS VARIANTES

O RCPSP consiste em definir os instantes de início e fim de cada uma das actividades constituintes do projecto, bem como os recursos a associar à execução de cada uma dessas actividades. Os recursos são limitados e têm de ser alocados às actividades de modo a permitir a conclusão do projecto, tendo em conta um determinado objectivo de optimização, normalmente a minimização da duração do projecto [6].

A formulação do RCPSC na sua forma clássica considera um conjunto de suposições [7]:

- Um projecto contém diferentes actividades, as quais possuem restrições de precedência. Duas actividades fantasma são introduzidas: a actividade 1 representa a actividade de início do projecto e é a predecessora directa ou indirecta de todas as actividades do projecto, enquanto a actividade N é a actividade final do projecto e é uma sucessora directa ou indirecta de todas as actividades.
- As actividades estão relacionadas por um jogo de relações de precedência. Uma actividade não pode iniciar antes que todas as actividades que a precedem terminem.

- Nenhuma data de início ou de término é imposta a qualquer actividade do projecto.
- Cada actividade  $i$   $\{i = 1, \dots, N\}$  tem uma duração fixa  $d_i$  (os tempos de preparação são desprezáveis ou estão incluídas na duração fixada).
- Cada actividade  $i$  requer um número fixo de unidades  $r_{ik}$  de um recurso renovável do tipo  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ). Os requerimentos de recurso  $r_{ik}$  são conhecidos.
- A disponibilidade  $a_k$  de um recurso renovável do tipo  $k$  é também uma constante conhecida ao longo do intervalo de duração do projecto.
- Nenhuma actividade pode ser interrompida depois de iniciada (não é permitido preempção de actividade).
- O objectivo é completar o projecto logo que possível, sem violar qualquer restrição de recurso e de precedência.

Todas as considerações apresentadas sobre o RCPSP clássico são seguidas neste trabalho, à excepção da consideração de existência de actividades fantasmas.

O modelo do RCPSP é o seguinte:

Objectivo:

$$\text{minimizar } f_N \quad (1)$$

E está sujeito a:

$$f_i \leq f_j - d_i \quad \forall (i, j) \in H, \quad (2)$$

$$f_1 = 0 \quad (3)$$

$$\sum r_{ik} \leq a_k \quad \forall k = 1, \dots, K; 1, \dots, f_n, i \in S_t \quad (4)$$

Onde:

$a_k$ : a disponibilidade total do recurso tipo  $k$ ;

$d_i$ : a duração da actividade i;

$f_j$ : a data de término da actividade i;

N: o número de actividades no projecto;

H: o conjunto de pares de actividades indicando relações de precedência final-início;

K: o número de tipos de recursos;

$r_{ik}$ : a quantidade de recursos do tipo k que é requerida pela actividade i;

$S_t$ : o conjunto de actividades em progresso durante o intervalo de tempo  $(t - 1, t) = \left\{ \frac{t}{f_i} - d_i < t < f_i \right\}$

A equação (1) corresponde à minimização da data de conclusão do projecto. A equação (2) tem em consideração as relações de precedência entre o par de actividades (i, j), onde i é a actividade que precede j. Indica que j não pode iniciar antes de i terminar. A equação (3) indica que a data de término da primeira actividade é 0, considerando que tal actividade é fantasma. Por fim, a equação 4 indica que a quantidade de um determinado recurso requerida por uma dada actividade não pode exceder a disponibilidade do recurso em questão.

Lopez Vaca [8] sugere a divisão do RCPSP em diferentes variantes de acordo com: o número de projectos simultâneos, a natureza da informação do projecto, os tipos de ligações permitidos, a possibilidade de interrupção, os modos de processamento, a natureza dos recursos utilizados, o número de recursos utilizados, o número de objectivos e os tipos de objectivos.

### **Número de Projectos Simultâneos**

Um problema de programação de projectos pode envolver um único projecto (*single-project* - RCPSP) ou pode envolver vários projectos simultaneamente (*multi-project* - RCMPSP).

## **Natureza da Informação do Projecto**

Quando os dados sobre as actividades e os recursos envolvidos são determinados com precisão, diz-se que o problema é de natureza determinística. Pelo contrário, quando alguns dos principais dados são representados por uma distribuição de frequências, diz-se que o problema é de natureza probabilística.

## **Tipos de Ligações Permitidos**

Os problemas podem permitir um ou mais tipos de ligações entre actividades: Início-Início (*Start to Start*); Início-Final (*Start to Finish*); Final-Início (*Finish to Start*) e Final-Final (*Finish to Finish*).

## **Possibilidade de interrupção**

Outro factor de diferenciação dos problemas é a possibilidade (ou não) de interromper a execução de uma actividade e retomá-la mais tarde. Este tipo de problema é dito preemptivo. Quando não existe a possibilidade de continuar a execução após paragem, o problema denomina-se de não-preemptivo [9].

## **Modos de processamento**

Outro ponto importante que distingue os projectos é o número de alternativas à execução de uma actividade. As actividades de cada projecto podem conter diversos modos de execução. Caso exista um único modo de execução o problema é denominado de *single-mode* (modo único). Se as actividades tiverem vários modos de execução possíveis os problemas são do tipo *multi-mode* (multi-modo) [10]. Nos problemas de modo único tanto a duração das actividades como a necessidades de recursos surgem sem alternativa de escolha. Nos problemas multi-modo as actividades podem ser processadas de vários modos. Cada modo é caracterizado pelo seu tempo de processamento e quantidade/tipo de recursos necessários para a realização da actividade.

## **Natureza dos recursos disponíveis**

A natureza dos recursos disponíveis é, regra geral, dividido por três grandes grupos: recursos renováveis, recursos não renováveis ou recursos duplamente restritos [11].

*Recursos renováveis*: estão em cada período de planeamento restritos a um determinado valor, sendo repostos numa base periódica. A disponibilidade por período pode ser

constante ou variar de período para período. Um exemplo deste tipo de recursos são os recursos humanos.

*Recursos não renováveis*: número limitado de recursos até ao final do projecto. Tais recursos não são renovados numa base periódica como os renováveis. A matéria-prima, por exemplo, pode ser considerada um recurso não renovável.

*Recursos duplamente restritos*: sofrem a dupla restrição de serem limitados nos períodos de tempo e no horizonte do projecto. Esses recursos podem ser desdobrados em recursos renováveis e em recursos não renováveis. Um exemplo deste tipo de recursos pode ser o dinheiro disponível para a realização global do projecto, que em cada período apenas está disponível um determinado montante.

### **Número de Recursos Utilizados**

Um projecto pode utilizar apenas um único recurso (*single resource*), ou múltiplos recursos (*multiple resources*).

### **Número de Objectivos**

Um problema de RCPSP geralmente possui um único objectivo (*single objective*) a ser maximizado ou minimizado, como é o caso do procedimento padrão, que minimiza a duração total do projecto. No entanto, é possível trabalhar simultaneamente com objectivos múltiplos (*multiple objectives*).

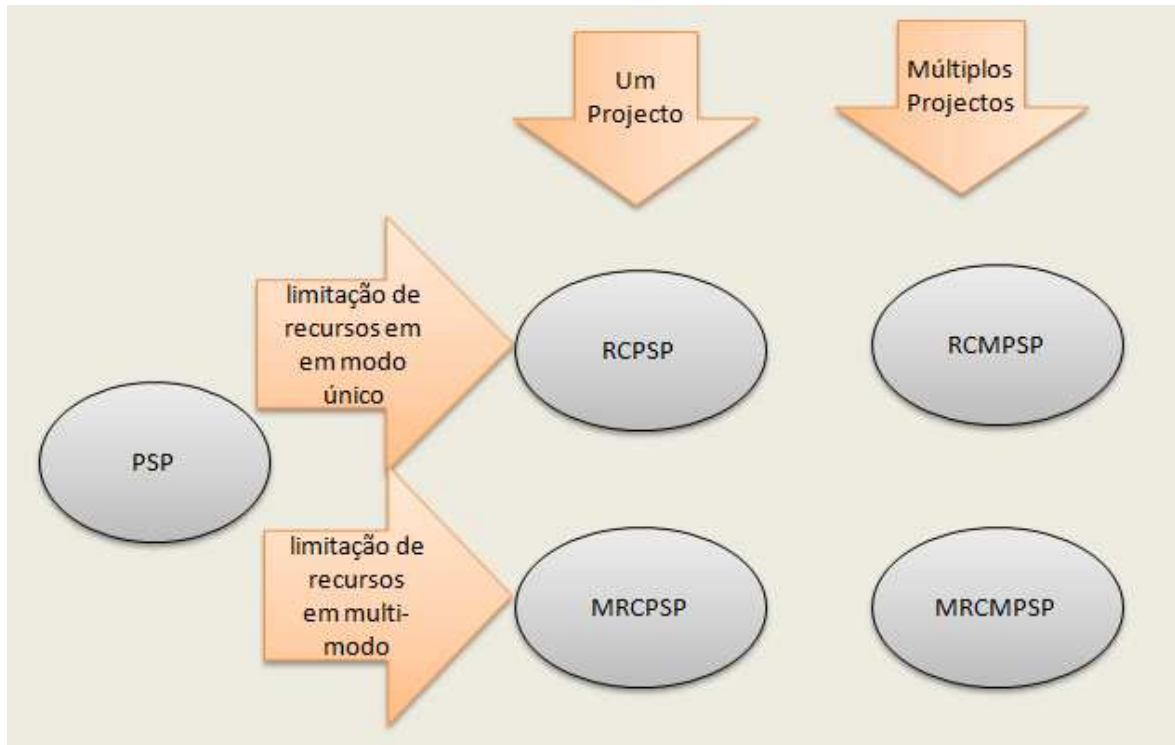
### **Tipos de Objectivos**

Existem muitos tipos de objectivos possíveis para um RCPSP; os tipos mais comuns são:

- Minimização do Tempo de Execução do Projecto (*Project Completion Time*)
- Minimização do Custo Total do Projecto (*Overall Project Cost*)
- Maximização do Valor Presente do Projecto (*Project Present Value*)

Com a combinação destas características surgem diferentes tipos de problemas. Desde o problema de sequenciamento de actividades sem limitação de recursos (PSP, do inglês *Project Scheduling Problem*) até ao problema multi-modo de escalonamento de actividades de múltiplos projectos que concorrem pelos mesmos recursos limitados (MRCMPSP). Se,

por exemplo, um único projecto de sequenciamento de actividades tiver limitação de recursos e diversos modos de execução, denomina-se de Problema Multi-modo de Sequenciamento de Actividades com Restrição de Recursos (MRCPSP). Alguns tipos de problemas são apresentados na figura 5.



**Figura 5 Tipos de Problemas**

O exemplo demonstrado no capítulo 4 desta tese trata de MRCMPSP com informação determinística, considerando ligações Final-Início, não preemptivo, com diversos tipos de recursos renováveis e com objectivos de escalonamento bem definidos.

## **2.2. TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO**

Nesta secção são referidas algumas técnicas de optimização usadas na resolução de problemas de sequenciamento existentes. Na secção seguinte serão referidos trabalhos onde as técnicas foram usadas.

As técnicas de optimização baseiam-se em dois paradigmas: algoritmos exactos e algoritmos aproximados (técnicas heurísticas).

Os algoritmos exactos garantem a obtenção da solução óptima de um problema, isto é da solução que fornece o melhor valor possível para o objectivo que se está a optimizar.

Naturalmente, seria sempre desejável utilizar tais algoritmos na resolução de problemas. Infelizmente estes algoritmos são inefficientes na obtenção de soluções para problemas de optimização de elevada complexidade computacional e não conseguem encontrar num tempo limitado a solução óptima do problema. Nesse caso, resta recorrer aos algoritmos heurísticos que propõem soluções admissíveis, expectavelmente de boa qualidade, mas não garantidamente óptimas.

### **2.2.1. ALGORITMOS EXACTOS**

Os algoritmos exactos são baseados em técnicas matemáticas e garantem que não existe uma solução melhor do que a que fornecem, tendo em conta um objectivo que se pretende optimizar. Os métodos Simplex e *Branch-and-Bound* são exemplos de algoritmos exactos.

O método Simplex, criado por George Dantzig, é um algoritmo que permite resolver repetidas vezes um sistema de equações lineares para que se obtenha uma sucessão de soluções básicas admissíveis. O objectivo do método é que através da manipulação das equações lineares se consiga obter uma solução básica admissível óptima, ou seja, a melhor solução de todas atendendo às restrições impostas pelo problema [12].

O método *Branch-and-Bound* consiste em dois procedimentos: *branching* (ramificação) e *bounding* (delimitação). Na fase de ramificação divide-se um problema em dois ou mais sub-problemas. Na fase de delimitação calcula-se o limite superior e inferior do espaço de soluções [13]. No fundo, é um método baseado na partição e avaliação sucessiva do espaço de soluções. Normalmente este método é representado por meio de uma árvore de procura de soluções, na qual se vão eliminando soluções parciais sucessivamente até se delimitar o espaço onde a solução óptima se encontra.

### **2.2.2. HEURÍSTICAS**

As técnicas heurísticas encontram soluções admissíveis e não necessariamente óptimas para um problema. Têm como factor aliciante à sua utilização o facto de produzirem soluções expectavelmente de boa qualidade com tempos de execução aceitáveis.

Estes algoritmos podem ser subdivididos em construtivos, de melhoramento e híbridos sendo que a maioria dos métodos heurísticos usados na resolução de RCMPSP é baseada em algoritmos construtivos (regras de prioridade).



## HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Nos algoritmos heurísticos construtivos a solução é construída de raiz. O algoritmo vai iterativamente escolhendo e adicionando um novo elemento à solução actual até que esta se torne viável. Estas heurísticas tendem a fornecer, com rapidez, soluções de boa qualidade mas apresentam como desvantagem o facto das regras que lhe são associadas estarem, normalmente, fortemente relacionadas com características específicas do problema [14].

Existem diversas regras de prioridade utilizadas nos algoritmos de sequenciamento de actividades em multi-projecto. Entre elas destacam-se a regra *First Come First Served* (FCFS) onde à primeira actividade sem precedência é atribuída a prioridade mais elevada. Esta regra não leva em consideração os recursos de que as actividades necessitam para atribuir as prioridades.

A regra *Shortest Activity for the Shortest Project* (SASP) indica as precedências com base na duração dos projectos. Contrariamente à regra FCFS, na atribuição de prioridades leva em conta o tamanho dos projectos e suas actividades. De modo geral, a regra SASP indica que as actividades menos morosas dos projectos devem ser realizadas em primeiro lugar para numa segunda fase restarem apenas as actividades mais demoradas.

Contrariamente à regra SASP na regra *Maximum Total Work Content* (MAXTWK) o gestor de projecto atribui a máxima prioridade às actividades que necessitem de mais recursos. Nesta regra assume-se que as actividades que precisam de um menor número de recursos e tempo de trabalho podem ser completadas em paralelo com as actividades com necessidades maiores.

A regra *Resource Scheduling Method* (RSM) é semelhante à MAXTWK. O gestor de projecto atribui os recursos às actividades que poderiam aumentar a duração do projecto se os recursos fossem inadequados. Neste processo o decisor, através do método CPM, determina o prazo de execução do projecto e, seguidamente, identifica as actividades críticas para o projecto. Posteriormente, verifica as limitações de recursos que existem e ajusta o sequenciamento de modo a que as actividades mais necessitadas de recursos sejam prioritárias. O objectivo é minimizar a duração do projecto. A atribuição da prioridade é feita às actividades que simultaneamente sejam consideradas críticas e necessitadas dos recursos mais escassos.

Existem actividades que, por diversos motivos, não podem ser trabalhadas em paralelo com quaisquer outras. Estas actividades são, naturalmente, escalonadas em série com outras. A regra *Most Total Successors* (MTS) visa atribuir prioridade aos sequenciamentos com maior número de actividades em série. Logo, esta regra atribui maior prioridade à actividade que seja sucedida pelo maior número de actividades em série. Para dois projectos similares é dada prioridade ao projecto com o maior número de actividades por concluir. Esta regra ignora o tempo de trabalho atribuído a cada actividade e ao projecto e é mais eficiente quando utilizada em dois projectos similares e com as mesmas datas de início e de conclusão.

Existem regras de prioridade baseadas inteiramente nas limitações de tempo existentes. É o caso das regras *Earliest Start Time* (EST), *Latest Start Time* (LST), *Early Finish Time* (EFT), *Latest Finish Time* (LFT), and *Minimum Slack* (MINSLK).

A regra LST indica o tempo de espera máximo para que se processe o início de uma actividade de modo a que o projecto não se prolongue além do previsto. Pelo contrário, EST indica o quão antes do início previsto uma actividade pode ser iniciada. A diferença entre ambas as regras é a folga que a actividade pode ter.

A regra LFT indica o tempo máximo para que a actividade se conclua e EFT indica o tempo mínimo para que a actividade se conclua. Novamente, a diferença entre ambas as regras é a folga permitida à actividade.

A diferença entre a regras LST e LFT ou entre as regras EST e EFT é a duração prevista da actividade.

A regra MINSLK pretende minimizar a folga existente em cada actividade (é o mesmo que minimizar a diferença entre EST e LST).

Apesar das heurísticas construtivas serem técnicas que procuram boas soluções a um custo computacional razoável, não garantem soluções óptimas. Certas heurísticas são tão específicas e dependentes do tipo de problema tratado que só podem ser usadas para um tipo de problema particular [15].

Por isso se desenvolveram as meta-heurísticas, que são heurísticas (ou combinação delas) tão gerais que podem ser usadas numa larga quantidade de problemas. Podem mesmo ser

usadas em combinação com outros métodos. Por exemplo, podem fazer uso da combinação de heurísticas construtivas e de pesquisa local procurando obter os melhores resultados.

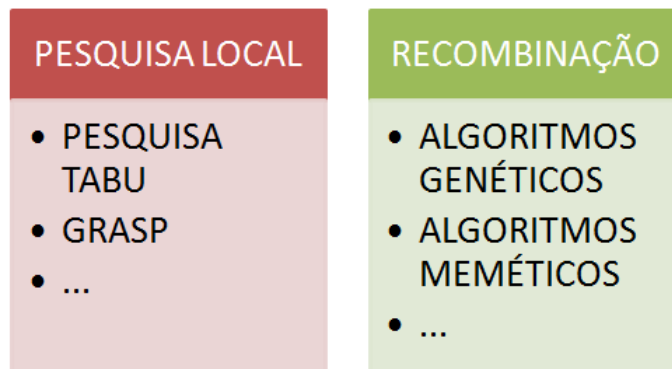
### **HEURÍSTICAS DE MELHORAMENTO (META-HEURÍSTICAS)**

Em contraste com os algoritmos construtivos, os métodos de melhoramento são aplicados quando já se dispõe de uma solução inicial admissível para o problema. Nestes métodos a solução final é obtida por aperfeiçoamento da solução inicial dada, através de alterações sucessivas na solução vigente. A solução inicial dos algoritmos de melhoramento pode ser obtida por via de uma heurística construtiva. Embora as heurísticas construtivas sejam, em geral, mais rápidas do que as de melhoramento, as últimas apresentam, frequentemente, soluções de melhor qualidade [16]. As heurísticas de melhoramento, comumente referidas por meta-heurísticas, possibilitam escapar a ótimos locais, permitindo a pesquisa em regiões mais promissoras. Porém, não garantem soluções ótimas, à semelhança das heurísticas [17].

A utilização de meta-heurísticas depende da definição, quer de regras de construção que permitam obter uma ou mais soluções de partida para a pesquisa, quer de operações que permitam alterar essas soluções. Seguindo um processo iterativo as operações de alteração são aplicadas a soluções e, em cada iteração, independentemente do problema considerado, o algoritmo de nível superior decide se as soluções que daí resultam deverão, ou não, ser aceites como ponto de partida para novas alterações [18]. Este tipo de algoritmos tem capacidade de gerar soluções de boa qualidade num tempo suficientemente rápido em problemas de elevada complexidade.

Os procedimentos enquadrados como meta-heurísticas dividem-se em dois grandes grupos: algoritmos baseados em pesquisa local e em recombinação (ou algoritmos evolutivos), tal como indica a figura 6.

As meta-heurísticas baseadas em pesquisa local compreendem os métodos que exploram uma vizinhança a cada iteração e escolhendo apenas um elemento dessa vizinhança nessa iteração. Esse tipo de varredura do espaço de soluções gera um caminho ou trajectória de soluções, obtida pela transição de uma solução para outra de acordo com os movimentos permitidos pela meta-heurística.



**Figura 6 Tipos de Meta-heurísticas**

O desempenho do algoritmo de pesquisa local depende fortemente da solução inicial e da estrutura de vizinhança utilizada.

Dois exemplos de meta-heurísticas baseadas em pesquisa local são a Pesquisa Tabu e o GRASP.

#### **a. PESQUISA TABU**

A Pesquisa Tabu é uma meta-heurística de pesquisa local que considera que, para melhorar a eficiência num processo de exploração, deve-se não só guardar as informações locais, mas também armazenar informações relacionadas ao processo de exploração como um todo. Isto implica o uso de memórias, facto que distingue esta de outras meta-heurísticas. Enquanto outros métodos guardam apenas a melhor solução obtida até ao momento, este método armazena informações sobre o percurso utilizado, junto com as soluções mais recentemente visitadas. Estas informações servem para guiar os movimentos futuros [19].

Para o bom desempenho do algoritmo é essencial a correcta definição dos recursos que o método utiliza. Entre eles: lista tabu e tamanho desta, memórias de curto e longo prazo, critérios de intensificação, aspiração, diversificação e paragem.

A lista tabu é comumente utilizada para classificar elementos como proibidos ou tabu, não permitindo, durante um certo número de iterações, que esses sejam removidos da solução ou adicionados à mesma.

A partir de uma solução inicial admissível, esta meta-heurística procura melhorar a solução corrente através de pesquisa local. Pode-se ainda utilizar o recurso de diversificação, na tentativa de construir soluções que pertençam a regiões não exploradas do espaço de

pesquisa e que difiram significativamente das soluções até aí encontradas [19]. Esta abordagem evita retornar por caminhos recentemente trilhados, com base nos movimentos proibidos incluídos na lista tabu.

Outro elemento básico nesta meta-heurística é o chamado critério de aspiração, o qual define quando um movimento, embora presente na lista tabu, é permitido [11].

O método de paragem restringe-se, normalmente, a um simples limite sobre o número total de iterações ou então sobre o número de iterações consecutivas em que uma melhor solução não seja encontrada.

Convém observar que a Pesquisa Tabu não oferece qualquer garantia de que irá produzir uma solução óptima. Contudo, em geral, o que se verifica é que as soluções geradas são bem superiores às retornadas pelas heurísticas clássicas de pesquisa local [17].

#### **b. GRASP**

Continuando nas meta-heurísticas baseadas em pesquisa local, a meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) é formada pela repetição de um algoritmo de duas fases: a construtiva, que determina a solução que será submetida à pesquisa local, segunda fase do algoritmo, cujo objectivo é tentar obter alguma melhoria na solução corrente [19].

Na fase de construção é construída uma solução admissível, elemento a elemento. Os melhores candidatos a compor a solução são ordenados numa lista chamada de lista restrita de candidatos (LRC). A escolha do próximo elemento é dita adaptativa, pois é guiada por uma função gulosa que mede o benefício que o elemento a adicionar à solução concede à parte já construída. O GRASP possui uma componente probabilística, na escolha aleatória de um elemento da lista de candidatos (num algoritmo guloso simples seria seleccionado o primeiro elemento da lista). Esta técnica de escolha permite que diferentes soluções sejam geradas a cada iteração GRASP [20].

Uma vez obtida uma solução de partida, aplica-se a estrutura de vizinhança a essa solução. A pesquisa realiza sucessivas trocas na solução corrente, e sempre que uma solução melhor é encontrada na vizinhança as operações de vizinhança passam a ser aplicadas a essa solução. Este procedimento termina quando nenhuma solução melhor é encontrada ao fim de um número pré-definido de iterações [20].

Em contraposição aos métodos de pesquisa local, existem aqueles que exploram uma população de soluções a cada iteração. Esses métodos utilizam estratégias de pesquisa que são capazes de explorar várias regiões do espaço de soluções de cada vez. Dessa forma, ao longo das iterações não se constrói uma trajectória única de pesquisa pois novas soluções são obtidas através de combinação de soluções anteriores. Alguns exemplos de meta-heurísticas evolutivas são os algoritmos genéticos e os algoritmos meméticos [21].

### **c. ALGORITMOS GENÉTICOS E ALGORITMOS MEMÉTICOS**

Os algoritmos genéticos fazem uso de uma analogia com o fenómeno natural da evolução dos organismos vivos. A ideia base destes algoritmos é a de simular o desenvolvimento de populações de indivíduos de uma espécie com características cada vez melhores, ou mais desejáveis, face a uma selecção natural. Estas características são determinadas ao nível genético pelo modo como são combinados os cromossomas dos progenitores [15].

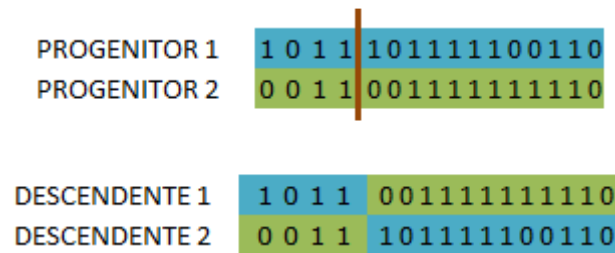
Nos algoritmos genéticos, os cromossomas são uma estrutura de dados que representam uma possível solução do problema. Por exemplo, uma cadeia de bits pode representar um cromossoma (10101110). Cada elemento ou variável presente no cromossoma é denominado de gene, sendo que no exemplo dado existem apenas dois valores para os genes – 0 e 1.

Os algoritmos genéticos começam com uma população inicial de um certo número de cromossomas cujos valores de qualidade foram determinados. O valor de qualidade corresponde ao valor de uma função de avaliação usada para medir o grau de aptidão de um cromossoma em relação aos objectivos do problema.

Posteriormente, faz-se uma selecção dos cromossomas de maior qualidade para darem origem a uma nova geração. São aplicados operadores genéticos para obtenção dos cromossomas da geração seguinte. Estes operadores são o cruzamento (conhecido também por *crossover* ou recombinação) e a mutação (ver figuras 7 e 8). Após a aplicação dos operadores genéticos a população de cromossomas é alterada, substituindo-se os cromossomas com menor interesse (menor valor segundo a função objectivo) pelos descendentes criados. Ainda assim, o número populacional permanece constante.

Inicialmente aplica-se o cruzamento dos cromossomas seleccionados, gerando assim descendentes. Essa operação de cruzamento recombina genes dos cromossomas

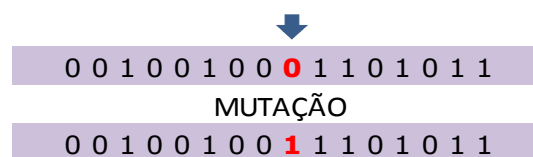
progenitores e forma descendentes que apresentam características de ambos os progenitores.



**Figura 7 Cruzamento de cromossomas**

Seguidamente, a uma pequena parte dos descendentes é feita uma mutação. A mutação modifica aleatoriamente um dos genes de um cromossoma, de modo a assegurar a diversidade de cromossomas na população.

Este processo é repetido até uma certa condição de paragem se verificar. Esta condição pode ser, por exemplo, ter decorrido um certo número de iterações/gerações, ou o melhor valor de qualidade na população ser constante ao longo de um certo número de gerações, ou a população ser sempre dominada pelos mesmos cromossomas [15].



**Figura 8 Mutação num cromossoma**

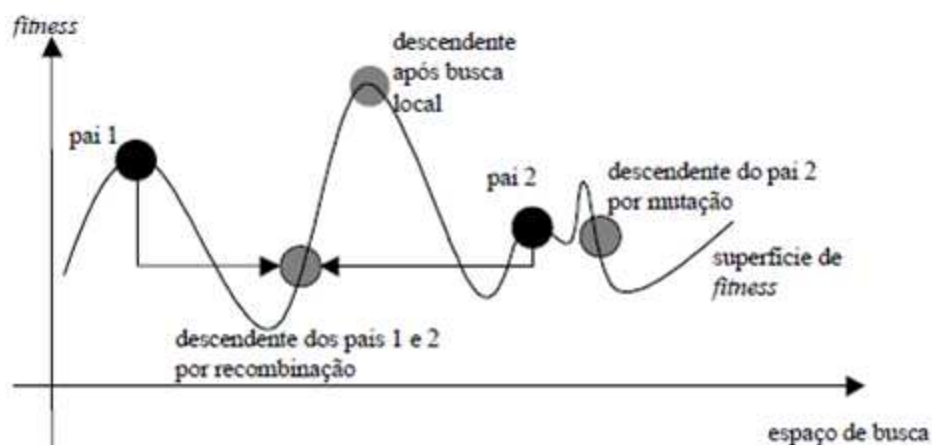
Os algoritmos meméticos derivam dos algoritmos genéticos. Ambos utilizam operadores de mutação e recombinação, mas diferem no facto dos algoritmos meméticos utilizarem processos de pesquisa local (pesquisas de melhores soluções que a actual na vizinhança).

A denominação de algoritmo memético provém do termo *meme* que foi idealizado como sendo uma unidade de informação que se reproduz durante um processo argumentativo e de transmissão de conhecimento. Portanto, pode-se dizer que, enquanto o algoritmo memético está relacionado com a evolução cultural, o algoritmo genético está baseado na evolução biológica dos indivíduos [22].

A ideia geral dos algoritmos meméticos é a utilização de operadores evolutivos (recombinação e mutação) que determinem regiões promissoras no espaço de pesquisa.

Posteriormente, utilizando a informação contida na população, novos pontos de partida podem ser descobertos após a pesquisa local.

Na figura 9 está presente uma relação entre o espaço de pesquisa e o *fitness* para o caso de maximização. O conceito de *fitness* pode ser definido como um valor que mede a qualidade da solução obtido em relação à função objectivo. Após a recombinação, o filho gerado pode possuir um *fitness* baixo, mas com um grande potencial para crescimento, de modo que uma pesquisa local pode levar o descendente a assumir um valor de *fitness* elevado. A mutação, por sua vez, pode levar a um pequeno aumento (ou decréscimo) do *fitness*, por representar uma perturbação local junto à representação do indivíduo [22].



**Figura 9** Recombinação, mutação e pesquisa local em algoritmos meméticos

## HEURÍSTICAS HÍBRIDAS

As heurísticas híbridas fazem uso de procedimentos exactos e heurísticos na pesquisa pela solução. Um exemplo de heurísticas híbridas é o método *Local Branching*. A principal ideia por trás do método *Local Branching* está em dividir a região viável de um problema em pequenas sub-regiões através da adição de inequações lineares ao modelo original e, em seguida, aplicar uma heurística a cada uma dessas regiões para se encontrar, pelo menos, uma solução admissível na vizinhança da solução inicial [23].

Uma interpretação possível da relação entre algoritmos pode ser vista na figura 10.



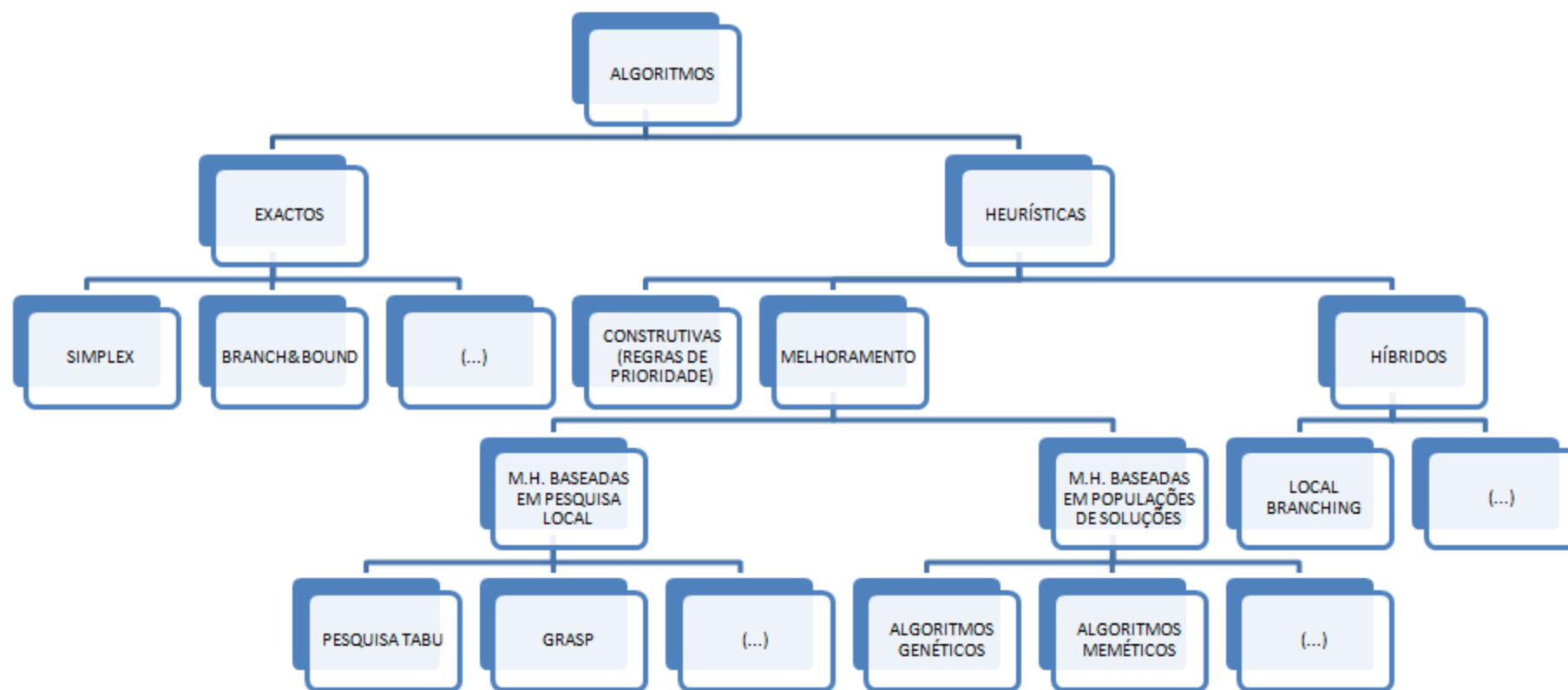


Figura 10 Esquema de relacionamento de algoritmos

## **2.3. ESTADO DA ARTE**

### **2.3.1. ALGORITMOS EXACTOS**

O RCPSP tem sido amplamente estudado usando diversas abordagens ao invés do RCMPSP. No problema RCPSP as soluções típicas são obtidas através de diversas técnicas de programação matemática. De entre os métodos exactos, os baseados em enumeração implícita com *branch-and-bound* foram os mais estudados para problemas RCPSP [24].

Existem alguns métodos exactos para resolver RCMPSP [25]. O pioneiro nesta área foi Pritsker [26] que propôs uma abordagem baseada em programação binária.

Mohanthy e Siddiq [27] estudaram o problema da atribuição de prazos para conclusão de actividades em ambiente multi-projecto. Este estudo apresenta um modelo de programação inteira que gera diversos escalonamentos e um mecanismo de simulação que, posteriormente, permite testar algumas heurísticas baseadas em regras de prioridade. O modelo escolhe o melhor escalonamento entre os gerados tendo em conta diversas regras de prioridade.

Ainda recorrendo ao *branch-and-bound*, Vercellis [28] descreveu uma técnica de decomposição Lagrangeana para a resolução de problemas multi-modo com limitação de recursos (MRCPSP). Esta decomposição pode ser útil de diversas formas, como, por exemplo, estabelecendo limites sobre a região óptima de soluções para que se encontrem as soluções de melhor qualidade [29]. Contudo, esse algoritmo está limitado à resolução de pequenos problemas RCPSP e é absolutamente impotente para resolver problemas RCMPSP com muitas actividades [30].

### **2.3.2. REGRAS DE PRIORIDADE**

A maioria dos métodos heurísticos usados na resolução de RCMPSP é baseada em regras de prioridade [29].

Kurtulus e Davis [31] estudaram um problema RCMPSP com cerca de 40 a 60 actividades. Entre as diversas regras de prioridade testadas as que apresentaram melhores resultados para quando o objectivo era o de minimizar os atrasos médios do projecto foram a MAXTWK, e a SASP, onde os atrasos eram medidos em relação ao caminho crítico.

Dumond e Mabert [32] analisaram cinco regras de prioridade e quatro estratégias na atribuição de prazos de execução aos projectos: fluxo médio, número de actividades, tempo do caminho crítico e tempo final de sequenciamento. O resultado computacional mostrou que a regra *First Come, First Served* (FCFS) era a que apresentava melhores resultados quando se pretendia minimizar o tempo médio de conclusão, a média de atraso, o desvio padrão do atraso e o atraso total.

Wiley et al. [3] desenvolveu um método utilizando a estrutura de divisão do trabalho (WBS) e uma decomposição Dantzig–Wolfe que gera diversos escalonamento multi-projecto. O agente de decisão pode então escolher qualquer uma das soluções baseando-se na sua própria experiencia e tolerância ao risco.

Ash [33] propôs um esquema de simulação determinístico que aproveita dados dos projectos para escolher uma heurística que para além de permitir bons sequenciamentos dos projectos também determina *a priori* que recursos vão ser atribuídos a cada actividade de cada projecto.

Lova et al. [34] desenvolveu uma heurística multi-projecto de multi-critério que consiste em diversos algoritmos baseados na melhoria multi-projecto. Através de um extenso estudo computacional, demonstrou-se que esta heurística multi-projecto melhora o escalonamento das actividades. A heurística é baseada em regras de prioridade, como MAXTWK, onde a máxima prioridade é dada às actividades que necessitem de mais recursos e MINLFT, minimização do tempo máximo para que a actividade se conclua.

Kolisch e Hartmann [35] estudaram, resumiram e categorizaram um vasto número de heurísticas. O estudo que fizeram apresenta as características de diversas heurísticas que potenciam bons resultados.

### **2.3.3. META-HEURÍSTICAS**

Existem diversos trabalhos que utilizam meta-heurísticas para tratar de problemas com restrições de recursos.

Lopez Vaca [8] utilizou algoritmos genéticos para resolver o MRCPSP problema de escalonamento de actividades com recursos limitados em ambiente de múltiplos modos (MRCPSP).

Baar et al. [36] desenvolveram dois algoritmos baseados em Pesquisa Tabu. Em ambos foram usadas listas tabu dinâmicas, assim como heurísticas de inicialização com base em regras de prioridade. Para obter uma boa solução inicial aplicaram diferentes heurísticas baseadas em regras de prioridade e seleccionaram a melhor solução encontrada.

Mori e Tseng [37] propõem um algoritmo genético com incorporação de informação específica do problema através de uma representação específica dos operadores genéticos.

Bouleimen e Lecocq [38] propuseram um algoritmo *Simulated Annealing* com representação do problema através de uma fila de actividades, construída na solução inicial através de regras de prioridade.

Hartmann [39] propôs um Algoritmo Genético baseado na representação de lista de actividades, e comparou com outros AG's regras de prioridade.

De Reyck e Herroelen [40] propuseram um método de procura local e outro de pesquisa tabu para resolver o MRCPSP com diversas restrições adicionais. A sua abordagem divide o problema em duas partes. Depois de ter determinado uma afectação possível dos modos às actividades, prossegue com a programação das actividades resolvendo um problema clássico do tipo RCPSP. Dos métodos testados, os melhores resultados foram obtidos com a pesquisa tabu. Um dos inconvenientes dos métodos propostos com base nas experiências computacionais foi o facto de algumas vezes os algoritmos falharem em encontrar soluções admissíveis para as instâncias [6].

Hartmann [41] apresentou um algoritmo genético para escalonar actividades de um problema MRCPSP. O algoritmo é baseado na lista de precedências das actividades e nos múltiplos modos possíveis. O resultado mostra um menor desvio das soluções geradas em relação à solução óptima.

Kim et al. [42] desenvolveu um algoritmo genético híbrido para resolver RCPSP baseado em lógica *fuzzy*.

Valls et al. [43] introduziu um algoritmo baseado em pesquisa tabu em problemas RCPSP.

Gonçalves et al. [29] apresentou um algoritmo genético que trabalha com RCPSP. Os escalonamentos são construídos usando uma heurística que os constrói baseando-se em prioridades, atrasos e datas de conclusão definidas pelo algoritmo genético.

## **2.4. SOFTWARE COMERCIAL DE GESTÃO DE PROJECTOS**

Existe um número significativo de softwares que auxiliam na gestão de projectos. A maioria deles permite fazer a gestão de recursos e a divisão de tarefas por diversos grupos de trabalho, alguns permitem gerir os custos, mas, no geral, poucos se preocupam com a vertente multi-projecto ou com uma resposta adequada a fenómenos não determinísticos, como a gestão de risco.

Seguidamente apresentam-se alguns dos softwares existentes com as características básicas necessárias na gestão de projectos, como a gestão de recursos e o escalonamento de actividades. Existem centenas de softwares deste tipo e todos com características semelhantes, apenas se diferenciando muitas vezes na interface gráfica.

No final do capítulo 3 são considerados dois softwares criados para fazer face às necessidades das empresas mais exigentes, pois apresentam uma abordagem à análise de risco, algo que os softwares descritos a seguir não fazem.

### **2.4.1. MULTI-PROJECT PLANNER**

Este software é especializado na gestão de vários projectos concorrentes que competem por recursos compartilhados. Ele divide as actividades dos projectos entre equipas de trabalho e apresenta um diagrama de Gantt onde cada linha representa o cronograma para cada equipa de trabalho. Além de se focar nas durações das actividades, apresenta propensão para o controlo dos níveis de recursos existentes e requeridos, o que permite evitar possíveis falhas nos projectos. O software permite uma planificação intuitiva, pouco complexa e tem uma interface bastante apelativa.

Inicialmente os projectos são considerados separadamente, exigindo a presença de diversas equipas de trabalho. Na sua integração para um único multi-projecto, as actividades similares são agregadas conseguindo-se reduzir o número de equipas de trabalho disponíveis, ou seja, cada equipa de trabalho desenvolve sempre a mesma tarefa, mas para projectos diferentes. Como se constata facilmente, esta agregação de projectos independentes com actividades semelhantes é benéfica no estabelecimento das ordens de trabalho.

Embora seja um software desenvolvido para agregar projectos semelhantes sem perder o controlo sobre os recursos partilhados, não oferece as ferramentas necessárias para um escalonamento com rigor – não se considera o risco, tudo é determinístico.

Conclui-se que o Multi-Project Planner se destina à agregação de actividades semelhantes de diferentes projectos por grupos de trabalho previamente definidos. Foca-se, sem rigor, ao planeamento de vários projectos em simultâneo, e sobretudo ao controlo dos níveis de recursos. A sua aplicação cinge-se a pequenas e médias empresas [44].

#### **2.4.2. RATIONALPLAN MULTI PROJECT**

RationalPlan é um grupo de softwares projectado para auxiliar gestores de projecto ao longo do ciclo de vida de seus projectos.

É composto por três produtos diferentes:

- *RationalPlan Single Project*
- *RationalPlan Multi Project*
- *RationalPlan Project Viewer*

O *RationalPlan Single Project* é adequado para gerir projectos independentes (sem recursos comuns, nem inter-relações entre eles).

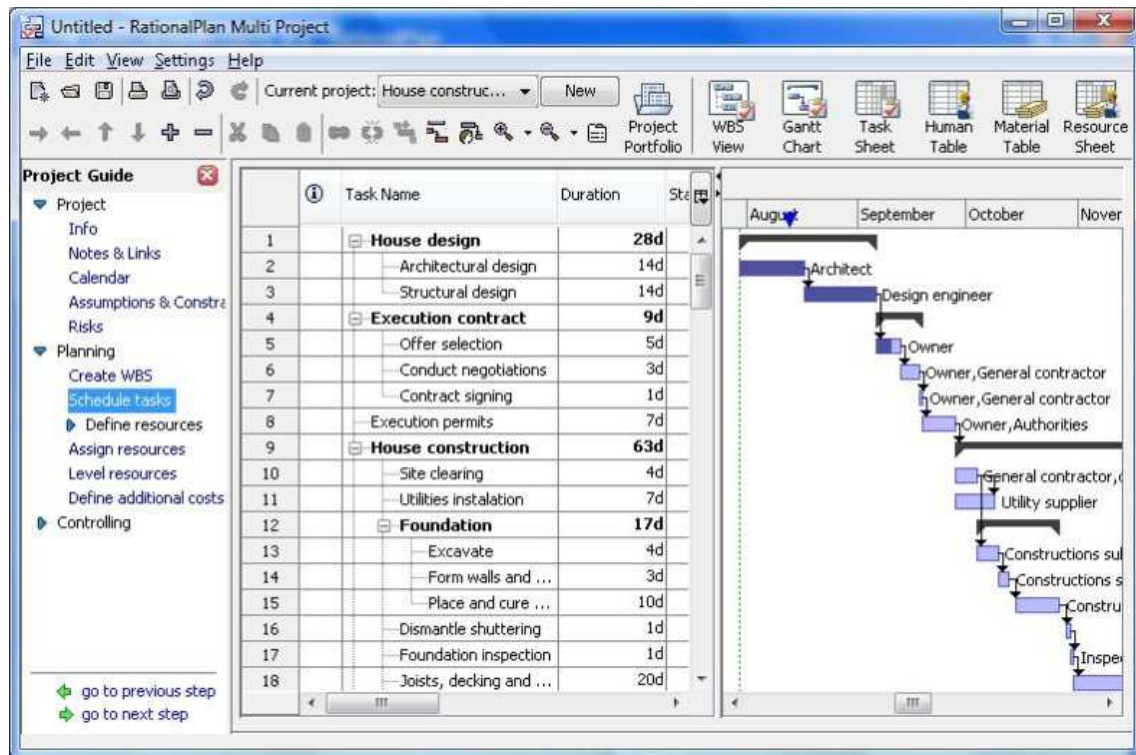
O *RationalPlan Project Viewer* é uma ferramenta adicional que permite aos colaboradores que não têm as competências dos gestores de projecto a visualização do estado do projecto.

O *RationalPlan Multi Project* é a escolha certa para se partilharem recursos e gerir interdependências entre projectos. Tem todas as características do *RationalPlan Single Project* e mais algumas:

- Recursos (trabalho, custo, alocação) são calculados tendo em consideração as suas necessidades em todos os projectos.
- Permite as ligações entre actividades relativas a projectos diferentes.
- Possui gestão de custos.

- Permite importar/exportar ficheiros do/para o *MS Project*.

Tem uma interface bastante intuitiva e tem sempre opções de auxílio ao gestor no eventual caso de este não compreender os atributos do software. Um exemplo do seu ambiente e trabalho está presente na figura 11.



**Figura 11 Vista do software RationalPlan Multi Project**

Possui menus divididos por temas, o que facilita a sua utilização. O menu *Project Portfolio* permite interligar diversos projectos num único multi-projecto. Contém ainda menus para ver a divisão do projecto em actividades (*WBS*), o progresso do projecto (gráfico de Gantt), os recursos materiais, maquinaria e recursos humanos considerados, uma vista que integra os recursos e custos nas actividades consideradas e um menu com os contactos dos clientes.

Além destes menus, o software ainda apresenta um pequeno ícone para que o gestor introduza os factores de risco que considera importantes para o projecto. É necessário introduzir o nível de impacto e de probabilidade dos factores de risco considerados. Para tal, o software oferece três níveis de impacto e probabilidade – baixo, médio e alto.

O estado dos factores de risco que não requeiram acções, aqueles que são aceites ou já estão mitigados, podem ser marcados como fechados (*closed*). Os factores de risco que possam vir a suceder são marcados como abertos (*opened*). Estes factores de risco não são atribuídos a actividades, nem são considerados no escalonamento das actividades, são apenas indicativos e sem real influência no desenrolar do projecto no simulador. Caso, na realidade, um factor de risco se manifeste, tem de se reescalonar o projecto a partir do momento em que tal se verifique. Assim sendo, não se pode afirmar que este software faça análise de risco – sabe que pode ocorrer mas não os previne ou analisa [45].

#### **2.4.3. GANTTPROJECT**

Funciona com todos os sistemas operativos, é um software livre de encargos (*open source*) que permite a gestão de recursos e actividades. É um software básico que tem como complementos a possibilidade de apresentar diagramas de Gantt e análise PERT. Dá especial foco à gestão de recursos humanos e à gestão do tempo de trabalho por actividade mas não possui gestão de custos nem consegue trabalhar em horas. A sua unidade temporal mínima é o dia. Não considera incertezas nas durações das actividades, nem faz análise de risco.

Uma verdadeira vantagem é o facto de conseguir importar e exportar projectos para o Microsoft Project e conseguir gravar dados em HTML e PDF de modo simples. Contudo, não é aconselhável a sua utilização para projectos de grande envergadura [46].

#### **2.4.4. DOTPROJECT**

O dotProject é um sistema de gestão de projectos de fácil utilização, com um conjunto de funcionalidades e características que o tornam indicado para implementação em ambientes corporativos, pois atende a diversas necessidades empresariais. É um software *open source*, ou seja, livre de encargos.

Ele é mantido e desenvolvido por um grupo de voluntários e pelos próprios utilizadores. O dotProject é uma aplicação Web e seu acesso é feito através de um navegador, logo, a sua utilização é independente de qualquer sistema operativo.

Este software permite saber quanto de cada tarefa já foi realizada, possui diagrama de Gantt, informação de utilizadores e colaboradores responsáveis por cada tarefa, lembretes sobre prazos próximos do fim, entre outros.



É um software básico, intuitivo, simples de utilizar e, sobretudo, permite a associação de projectos diferentes denotando, portanto, uma abordagem multi-projecto o que não é comum na maioria dos softwares deste tipo. No entanto, não considera determinante analisar o risco, cinge-se pelo escalonamento de actividades [47].

#### 2.4.5. COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES DE ESCALONAMENTO DE GESTÃO DE PROJECTOS

Convém compilar a informação mais relevante para permitir uma visão global sobre as características presentes em cada software. Assim, surge a tabela 1 seguidamente apresentada:

**Tabela 1 Comparação de algumas características entre softwares de escalonamento de gestão de projectos**

Comparação	Características				
Software	Multi-Projecto	Open Source	Gestão de Recursos	Gestão de Custos	Trabalha com Grandes Projectos
Multi-Project Planner	x		x	x	x
RationalPlan Multi Project	x		x	x	x
GanttProject		x	x		
dotProject	x	x			x

Na tabela 1 não se pretende reflectir sobre qual é o melhor software. Todos eles têm características que, numa dada situação, os podem fazer o melhor software. Mas no contexto dos aplicativos que permitem o multi-projecto nota-se, de modo claro, que todos eles apresentam as mesmas características fundamentais, à excepção do dotProject, que se foca apenas no escalonamento.



### 3. RISCO NO SEQUENCIAMENTO DE ACTIVIDADES COM RESTRICÇÕES DE RECURSOS

A gestão do risco é uma parte importante da gestão de projectos e deve ser considerada um processo contínuo e em constante desenvolvimento aplicado à estratégia da organização [2].

É comum considerar-se que o risco é composto por três componentes: um acontecimento ou factor que desencadeia o risco, a probabilidade de ocorrência desse evento e o impacto que decorre dele. Na gestão de risco procura-se maximizar a probabilidade de ocorrência de eventos que tragam consequências positivas ao projecto e minimizar a probabilidade de ocorrência de eventos adversos, que ponham em causa o desenvolvimento previsto do projecto.

A gestão do risco contém passos que ajudam a delinear os processos de combate ao risco. Eles podem ser definidos como [2]:

1. Planeamento da gestão do risco.
2. Identificação de factores de risco – determinação dos factores de risco que podem afectar o projecto e documentação de suas características.
3. Análise qualitativa dos factores de risco – priorização dos factores de risco para análise ou acção adicional subsequente através de avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e impacto.
4. Análise quantitativa dos factores de risco – análise numérica do efeito dos factores de risco identificados nos objectivos gerais do projecto.
5. Planeamento de respostas a factores de risco – desenvolvimento de opções e acções para aumentar as oportunidades e reduzir as ameaças aos objectivos do projecto.
6. Monitorização e controlo dos factores de risco – acompanhamento dos factores de risco identificados, monitorização dos factores de risco residuais, identificação de novos factores de risco, execução de planos de respostas a factores de risco e avaliação da sua eficácia durante todo o ciclo de vida do projecto.

Se bem que o trabalho apresentado neste documento foque só os pontos 2, 3 e 4, será feita uma breve descrição de todos os passos acima referidos.

### **1. Planeamento da gestão do risco**

Na fase de planeamento é definida a abordagem, as ferramentas, o tempo e os recursos que podem ser utilizados para analisar o possível aparecimento de factores de risco. São definidas as responsabilidades e os níveis de autoridade das pessoas e grupos de trabalho envolvidos na análise de risco e é realizado o WBS de modo a clarificar convenientemente as actividades que estão sujeitas a incertezas. Também se designam recursos e estimam-se custos necessários para a gestão do risco.

### **2. Identificação de factores de risco**

Na identificação de factores de risco é levada a cabo a determinação dos factores mais prováveis de afectar o projecto. Para tal, aproveita-se a experiência de cada colaborador e utiliza-se o histórico de factores de risco ocorridos em projectos semelhantes. Por norma, a técnica mais utilizada para criar medidas preventivas é a troca de ideias entre os diversos colaboradores (*brainstorming*). São listados os factores de risco identificados como

potenciais ameaças ao projecto e são estabelecidas respostas de mitigação (ou prevenção) do seu efeito caso estes se manifestem. Deve-se salientar que a identificação dos factores de risco é um processo interactivo que decorre ao longo de todo o projecto.

### 3. Análise qualitativa dos factores de risco

A análise qualitativa é o procedimento que visa avaliar o impacto e a probabilidade de ocorrência dos factores de risco identificados previamente. Nesta fase atribuem-se prioridades aos factores de risco de acordo com seu potencial efeito sobre as actividades do projecto. É importante saber que um factor de risco pode ter uma probabilidade de ocorrência e um impacto diferente de uma actividade para outra. Por isso, deve-se definir em cada actividade quais os factores de risco associados, bem como a probabilidade de ocorrerem e o impacto que podem provocar no desenrolar da actividade.

As prioridades são atribuídas aos factores de risco de acordo com suas possíveis implicações para o atendimento dos objectivos do projecto. A abordagem típica de atribuição de prioridade é por meio de uma matriz de probabilidade/impacto, tal como a presente na figura 12.

		IMPACTO					
		1	2	4	8	16	
PROBABILIDADE	90%	5	5	10	20	40	80
	70%	4	4	8	16	32	64
	50%	3	3	6	12	24	48
	30%	2	2	4	8	16	32
	10%	1	1	2	4	8	16




**Figura 12 Matriz Probabilidade/Impacto**

A escala da probabilidade pode variar de “muito baixa” a “muito alta” e a de impacto varia entre “muito pequeno” a “muito elevado”. A escala de valores pode variar de acordo com o rácio que o decisor deseje atribuir à probabilidade e ao impacto. Outro factor relevante é a tolerância ao risco manifestada pelo decisor. As combinações de probabilidade e impacto resultam numa classificação de risco alto (“condição vermelha”), risco moderado (“condição amarela”) e risco baixo (“condição verde”). Se o decisor for avesso ao risco a

matriz tenderá a estar recheada de valores vermelhos. Se pelo contrário for propenso ao risco a cor dominante será o verde. Um exemplo de uma matriz probabilidade/impacto está presente na figura 12, onde os valores de probabilidade variam de 1 a 5 e os de impacto de 1 a 16. Cada elemento da matriz é obtido pelo produto *probabilidade \* impacto* da linha e coluna respectiva.

A pontuação dos factores de risco ajuda a orientar as respostas a factores de risco. Por exemplo, factores de risco que, se ocorrerem, terão um impacto negativo nos objectivos (ameaças) e que se encontram na zona de alto risco (zona vermelha) da matriz podem exigir acções prioritárias e estratégias agressivas de resposta. As ameaças na zona de baixo risco (zona verde) podem não exigir nenhuma acção de gestão pró-activa, além da sua colocação numa lista de observação ou da sua adição a uma reserva para contingências.

No caso da matriz presente na figura 12 o decisor considera:

Baixo Risco:	1 a 4	
Médio Risco:	5 a 16	
Alto Risco:	20 a 80	

Como já se referiu, o nível de tolerância ao risco do agente de decisão influencia as margens dos factores de risco (um risco considerado médio pode passar a alto, etc.).

#### **4. Análise quantitativa dos factores de risco**

A análise quantitativa tem como objectivo analisar e quantificar numericamente a probabilidade de cada factor de risco ocorrer e as suas consequências sobre os objectivos do projecto. Esta análise complementa a análise qualitativa sendo que se devem associar os resultados obtidos em ambas as análises para se obter um panorama mais esclarecedor quanto aos efeitos dos factores de risco no projecto.

Estas análises usam, normalmente, técnicas tais como a simulação de Monte Carlo (ferramenta que gera múltiplas simulações e apresenta as soluções possíveis em forma de probabilidades ou número de ocorrências) e análise de decisão para determinar a probabilidade de se conquistar um objectivo específico do projecto (terminar o projecto antes de determinada data, por exemplo), quantificar a exposição ao risco do projecto,

determinar o tamanho da reserva de contingência do custo e do cronograma que pode ser necessária e identificar factores de risco que requerem maior atenção, quantificando sua contribuição relativa ao risco do projecto.

A análise probabilística que faz do projecto permite efectuar previsões de potenciais cronogramas do projecto e resultados de custo, listando as possíveis datas para a finalização ou duração do projecto e custos com os níveis de segurança associados deles.

## **5. Planeamento de respostas a factores de risco**

O plano de resposta ao risco é o processo de desenvolvimento de acções para melhorar oportunidades e reduzir ameaças nos objectivos do projecto. O plano de resposta ao risco deve ser apropriado para a severidade do risco, estimando um custo real, o tempo necessário para ser bem sucedido, dentro de um contexto realístico, acordado por todas as partes envolvidas e designado um responsável.

Mediante as opções de resposta ao risco disponíveis, o grupo de trabalho deve optar pelas ferramentas que melhor previnam potenciais falhas para cada actividade, isto porque existem várias respostas estratégicas ao risco. A melhor estratégia deve ser seleccionada para cada risco. As estratégias mais comuns são [2]:

1. Evitar o risco
2. Transferir o risco
3. Mitigar ou prevenir o risco
4. Aceitar o risco (assumindo as suas consequências)

Evitar o risco é mudar o plano de projecto feito de modo a eliminar o factor de risco ou para proteger os objectivos do projecto. Embora não se possa eliminar todos os factores de risco, alguns factores específicos podem ser evitados. Reduzir o âmbito do projecto para evitar as actividades de alto risco, acrescentar recursos ou tempo, ou evitar um fornecedor desconhecido são exemplos disso.

Transferir o risco não o elimina, apenas o coloca sob responsabilidade de terceiros. Transferir a responsabilidade do risco é a resposta mais eficaz nas transacções com risco de exposição financeira. Esta técnica é utilizada, por exemplo, nos seguros empresariais.

A mitigação procura reduzir a probabilidade e/ou consequências de um factor de risco. Tomar acções preventivas para reduzir a probabilidade ou o impacto numa actividade ou no projecto é mais eficaz que tentar reparar as consequências do factor de risco ocorrido. Tais acções devem ser aplicadas quer nas durações das actividades quer nos custos do projecto.

Na aceitação decide-se não alterar o plano do projecto para fazer face ao factor de risco ou então não é possível identificar outra estratégia de resposta apropriada.

A aceitação activa pode incluir desenvolver um plano de contingência para executar quando ocorrer um determinado factor de risco. A aceitação passiva não requer acção, deixando a equipa de projecto fazer um arranjo quando o factor de risco ocorrer.

Um plano de contingência é aplicado para factores de risco identificados que surjam durante o projecto. Desenvolvendo um plano de contingência antecipadamente pode-se reduzir enormemente o custo de uma acção quando ocorrer um desses factores de risco. A mais comum resposta de aceitação do risco é estabelecer uma ajuda de custo de contingência ou reserva, incluindo quantidades de tempo, dinheiro, ou recursos para cobrir a ocorrência do factor de risco.

É evidente que as estratégias consideradas funcionam para os factores de risco considerados. Portanto, é bom distinguir os factores de risco conhecidos e considerados daqueles que passam despercebidos. Quaisquer que sejam as medidas preventivas que se tomem, elas não devem surtir qualquer efeito de protecção nas actividades em relação aos factores de risco não previstos. Ainda assim, é muito difícil prever todos os factores de risco que vão influenciar a execução do projecto.

## **6. Monitorização e controlo dos factores de risco**

Por fim, deve-se monitorar e controlar as actividades de modo a que se existir um factor de risco com alta probabilidade de ocorrência, exista tempo para, por exemplo, deslocar recursos ou para fazer novo escalonamento, aplicando as medidas acordadas na fase de resposta aos factores de risco. O controlo das respostas aos factores de risco envolve o acompanhamento dos factores de risco identificados, a monitorização dos factores de risco residuais, a identificação de novos factores de risco, a avaliação da eficácia das acções executadas. O controlo das respostas aos factores de risco deve ser um processo contínuo



ao longo de todo o projecto, uma vez que a gestão dos factores de risco é um processo dinâmico.

A estratégia comumente adoptada é a mitigação dos factores de risco. Deve-se ter especial atenção nos projectos onde exista limitação de recursos, actividades com muitos predecessores (estão mais dependentes das contingências e dos atrasos anteriores) e tarefas com durações muito longas e com necessidades de diversos tipos de recursos.

A análise de risco mesmo sendo importante é muitas vezes posta de parte pois consome tempo ao gestor do risco, pode levantar questões inoportunas e possivelmente a sua utilidade não é perceptível de imediato. Contudo, tal análise ajuda a identificar factores de risco que podem pôr em causa o desenvolvimento previsto do projecto.

Deve-se listar todos os factores de risco passíveis de interferir no correcto desenvolvimento do projecto. Os factores de risco podem ser classificados como internos ou externos [48].

Os factores externos são aqueles que não podem ser controlados. Podem ser marcados como sendo previsíveis ou imprevisíveis. Entre outros pode-se apontar a instabilidade socioeconómica, as condições climáticas e ecológicas e a disponibilidade de matéria-prima.

Os factores internos são passíveis de serem previstos e controlados pelos especialistas que os analisam. Podem surgir por falta de um correcto planeamento, falha nos cronogramas de prazos e orçamentos de custos, falta de condições tecnológicas, entre outros.

Qualquer factor de risco é passível de influenciar a duração das actividades, os recursos consumidos, os custos envolvidos no projecto e pode mesmo colocar em causa a viabilidade do projecto.

Definidos os factores de risco que podem surgir no projecto atribui-se a cada actividade os factores de risco que a ela estão associados. Note-se que nem todos os factores de risco apresentam a mesma probabilidade de ocorrência ou têm mesmo impacto nas actividades. Cada factor de risco apresenta características próprias – uma probabilidade de ocorrência e um impacto – que podem variar mediante a actividade. Atente-se na tabela 2 [49].

**Tabela 2 Matriz de Actividades e Factores de risco**

FACTORES DE RISCO							
ACTIVIDADES	1	2	3	4	5	6	SOMA
A	20%	20%	40%	0%	0%	20%	100%
B	0%	0%	0%	50%	40%	10%	100%
C	20%	20%	40%	0%	0%	20%	100%
D	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
E	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%

Na tabela 2 estão explicitamente representadas cinco actividades (A a E) e são considerados seis factores de risco para cada uma delas (1 a 6). Note-se que, por exemplo, o factor de risco 1 tem diferentes probabilidades de ocorrência mediante as actividades.

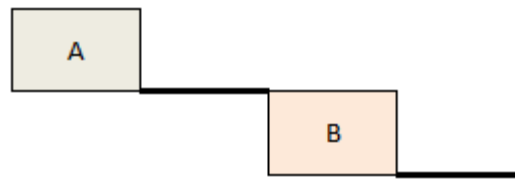
A soma dos factores de risco é 100% (fenómeno de aditividade dos factores de risco). Se nenhum factor de risco se manifestar a duração da actividade será a mínima possível. Porém, para se decidir que procedimentos tomar caso todos os factores de risco aconteçam na mesma actividade deve-se saber quais os impactos associados aos factores de risco em cada uma delas (ver matriz probabilidade/impacto, figura 12).

Na maior parte dos casos, os factores de risco e a sua probabilidade de ocorrência são listados a partir da experiência dos colaboradores envolvidos na gestão de risco e do histórico de problemas similares trabalhados. Tal via não é infalível e baseia-se, claramente, na intuição do grupo de trabalho o que pode levar a erros na elaboração da lista dos factores de risco e suas probabilidades e impactos.

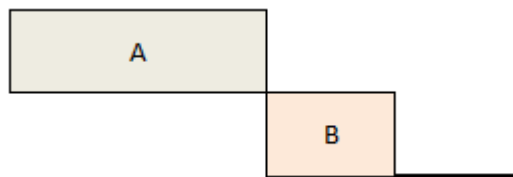
Feita a listagem dos factores de risco mais prejudiciais ao projecto, deve-se centrar a análise nas actividades que sejam passíveis de conter tais factores de risco.

De todas as actividades as que mais podem ser afectadas pelos factores de risco são as que possuam pontuações de criticidade mais elevadas e as que contenham menores folgas nas suas durações. É sabido que se um factor de risco ocorrer, a actividade vai necessitar de um tempo de duração adicional de modo a que tal factor possa ser mitigado (para além dos custos que tal operação acarreta). Deste modo, uma actividade com uma boa folga pode não necessitar de tempo alocado a actividades sucessoras. Porém, uma actividade com uma folga insuficiente pode ter de ocupar o tempo destinado a actividades seguintes, criando um atraso no projecto e originando prejuízos no mesmo. Um exemplo simples mostra que

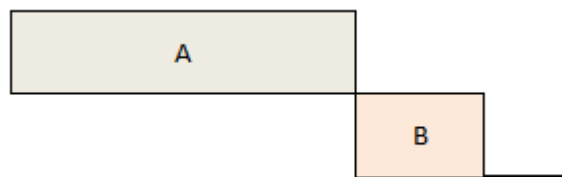
o atraso de uma actividade põe em causa o correcto funcionamento das actividades sucessoras. Considere-se A e B duas actividades de um determinado projecto:



Se a actividade A se atrasar deve cingir-se a ocupar, no máximo, a sua folga.



De modo contrário põe a actividade B e subsequentes em dificuldades, pois despende mais tempo do que o que lhe foi atribuído.



A actividade B não pode despende mais do que metade da folga que lhe foi atribuída, ou o projecto terá uma duração superior à prevista.

Existe uma dicotomia entre a duração das actividades e o custo dos recursos necessários. Muitas vezes o custo e a duração dos projectos são considerados factores independentes, mas não é esse o caso nos projectos reais. Quase sempre o prolongamento da duração de uma actividade leva a um aumento de custos, e em termos de simulação deve-se correlacionar ambas as variáveis para que o modelo esteja mais próximo da realidade.

Então, para diminuir os custos pode-se atrasar o início da actividade, mas a folga existente diminui, o que aumenta o risco de se ultrapassar os limites temporais impostos à actividade caso ocorra um factor de risco. Um escalonamento correcto das actividades tem de levar em conta estes factores para tentar conciliar a duração das actividades, o custo dos recursos utilizados pelas mesmas e as probabilidades de ocorrência de factores de risco, tudo isto sem comprometer os objectivos do projecto.

### 3.1. ESTADO DA ARTE

Existem diversas referências que abordam diversas análises de risco. Contudo, existem poucas referências que abordem o risco como parte do escalonamento de projectos. Ainda assim, seguem-se alguns estudos efectuados nesta área.

Hulett [50] explora o facto de certos softwares de escalonamento de actividades abordarem separadamente o risco no escalonamento e o risco nos custos. Segundo indica tal acontece porque se considera que os dados recolhidos sobre os custos permanecem válidos mesmo quando a duração das actividades varia. Hulett estuda a possibilidade de se integrar os custos e as durações na mesma análise de risco. Através de exemplos práticos explicita que mesmo realizando estudos separados entre custos e durações é possível integrá-los e obter resultados válidos. Demonstra que analisando só o risco nos custos ou só nas durações das actividades se obtêm resultados demasiado optimistas quando comparados com a integração de ambos. Conclui que é mais realista efectuar uma análise conjunta entre os custos e as durações do que separada.

Dawood [49] dá especial ênfase às análises de dados estocásticos. O seu objectivo é explorar o que causa a variação na duração das actividades e as dependências destas para com os factores de risco. Dawood inicia o seu trabalho pela identificação de factores que possam causar variação na duração das actividades, os ditos factores de risco. Os factores de risco que considera são externos ao projecto e impossíveis de controlar (tempo meteorológico, avaria de materiais, ...). Após associar os factores de risco às actividades que os possam manifestar, desenvolve um modelo de simulação atribuindo diferentes probabilidades de ocorrência a cada um deles. Efectua análises de correlação entre os factores de risco e a duração do projecto, testando vários cenários possíveis. Conclui que é possível que se consiga reduzir a variação na duração do projecto mas não aborda nenhuma análise de custo para atestar a sua viabilidade.

Valadares Tavares et al. [51] aborda a incerteza na duração das actividades e no número necessário de recursos o que se reflecte na incerteza dos custos do projecto. Com estes três factores afirma o seguinte: *“A adopção da menor (maior) data de início possível para cada actividade diminui (aumenta) o risco de atrasos mas aumenta (diminui) o custo do projecto”*. Uma vez que não se pode obter o melhor de cada factor sem prejudicar qualquer outro, um compromisso tem de ser atingido. Normalmente o custo e a duração dos projectos eram

considerados factores independentes mas não é esse o caso nos projectos reais nem a abordagem proposta nesse estudo.

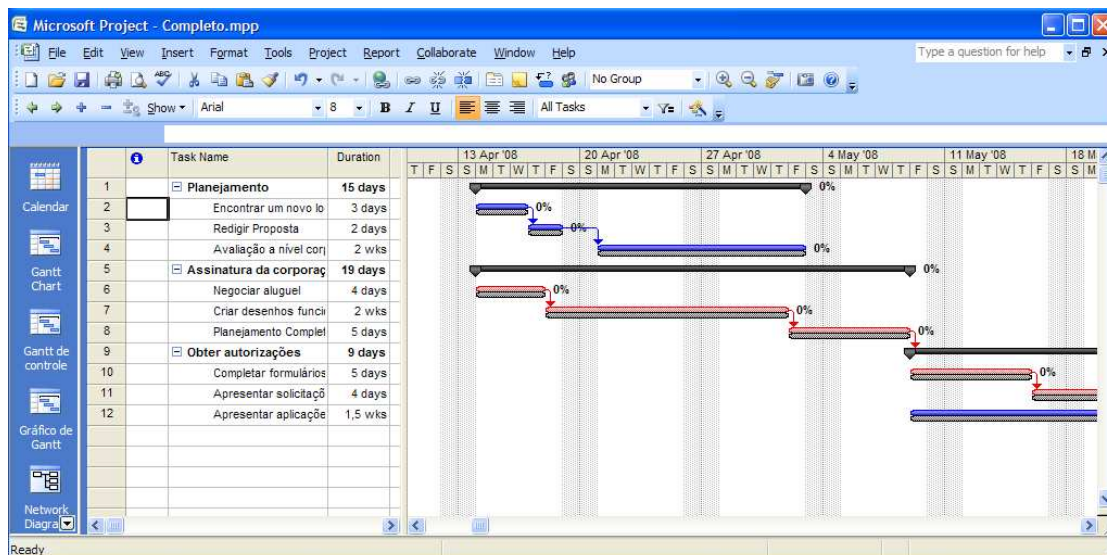
Para tal, propõe-se a utilização de uma variável de decisão que ajude a atingir tal compromisso – o *float factor*. Em vez de se utilizar uma variável de decisão por cada actividade existente adopta-se o *float factor* como variável única. Essa variável controla e sugere uma data de início para todas as actividades de modo a que a duração, o risco existente e o custo do projecto possam ser trabalhados de modo a apresentar a melhor solução possível de acordo com as condicionantes de cada factor. Conclui que os resultados gerados por este método são bastante realistas e tem a seu favor a utilização e manipulação de uma única variável em todo o processo. Contudo, ao generalizar-se um determinado período para que o início das actividades se dê, perde-se a noção da especificidade de cada uma das actividades, com o risco e custos intrínsecos.

### **3.2. SOFTWARE COMERCIAL DE ANÁLISE DE RISCO EM GESTÃO DE PROJECTOS**

#### **3.2.1. MICROSOFT PROJECT 2007**

O MS Project é um software usado na gestão de projectos. É utilizado para planear, programar e representar graficamente informações referentes a projectos, como a listagem das actividades a desenvolver por projecto, os recursos e custos envolvidos nos mesmos, as durações das actividades, entre outros. Além disso, o MS Project recalcula rapidamente os cronogramas e permite ver como as mudanças numa parte do projecto podem afectar o projecto como um todo.

Permite a utilização de diversas ferramentas como diagramas de Gantt (ver figura 13), diagrama de rede, visualização e gestão dos níveis de recursos e custos, análise de conflitos entre actividades, entre outros. Fundamentalmente, é uma ferramenta que permite a integração de vários projectos num único multi-projecto, apesar de o fazer de uma forma pouco intuitiva mas funcional. Deve-se iniciar cada projecto individualmente, cada qual num ficheiro do Microsoft Project e em seguida, para se integrar todos os projectos num único multi-projecto, deve-se criar um novo ficheiro onde se inserirão os projectos a trabalhar.



**Figura 13 Visão do MS Project 2007**

Para além desta característica, pela análise de PERT, integra a incerteza e o risco na gestão do projecto. Pode ser utilizada a vertente probabilística na duração das actividades.

Para se conseguir executar uma análise de risco no MS Project é necessário possuir um *add-in*: normalmente o software @Risk ou o Risk+.

O @Risk usa a simulação Monte Carlo para mostrar diversos cenários do projecto e indica as probabilidades de cada um ocorrer. Com uma simulação dos dados presentes no modelo do projecto, o @Risk apresenta diversos resultados possíveis ao invés de um único.

Com uma forte componente gráfica, o que o software basicamente faz é substituir os valores incertos das variáveis por funções de distribuição de probabilidade. Possui ferramentas como análise de sensibilidade e análise de cenários para se determinar os factores críticos do projecto. Estas ferramentas ordenam as variáveis com incerteza de acordo com o impacto que elas têm nos resultados [52].

O Risk+ simula e quantifica diversos cenários envolvendo os custos e escalonamentos alternativos associados ao projecto. Através de múltiplas simulações, o software indica detalhadamente onde o risco se pode tornar falha. O software integra os custos variáveis com as durações das actividades. Assim, com a variação da duração das actividades varia também o custo associado a estas. Faz análise de sensibilidade para identificar as actividades que têm maior impacto na data de término do projecto [53].

Ambos os *add-ins* apresentam sensivelmente as mesmas características, e qualquer um deles é uma boa escolha para auxiliar o MS Project na análise de risco.

Em termos genéricos os *add-ins* apresentam as seguintes características:

- Simulação de Monte Carlo – cálculo de múltiplos cenários de um modelo de forma automática;
- Conjunto de distribuições de probabilidades – permite transformar as variáveis determinísticas em probabilísticas;
- Análise de sensibilidade e gráfico Tornado – identifica as variáveis de entrada mais críticas e apresenta correlações com as variáveis de saída;
- Correlações – modela dependências entre incertezas de variáveis de entrada;
- Gerador de relatórios e gráficos - gera relatórios estatísticos com dados e gráficos dos resultados e das premissas adoptadas;
- Controle de precisão – controla o nível de confiança dos resultados [54]

Assim sendo, conclui-se que o MS Project auxilia o gestor de projecto em três etapas distintas do projecto:

1. Criação do Projecto: a primeira fase envolve a definição das actividades, incluindo a sua duração e relação com a globalidade do projecto.
2. Gestão do Projecto: envolve o controlo das tarefas e recursos até ao final do projecto, efectuando as adaptações necessárias de modo a manter o projecto em funcionamento.
3. Sumário do Projecto: gera relatórios e gráficos que reportam os detalhes do projecto.

Por tudo isto, o MS Project é considerado como uma ferramenta de qualidade superior no tocante à gestão de projecto, pois auxilia em qualquer campo o gestor de projecto.

### 3.2.2. PRIMAVERA PERTMASTER

Provavelmente o software que mais rivaliza com o MS Project, em termos de utilizadores e funcionalidades que disponibiliza. Possibilita o controlo de grandes projectos e de elevada complexidade, dado que contém ferramentas que actuam em todos os campos da gestão de projectos. No campo da incerteza, pode-se modelar a duração e custo das actividades, regular o custo e o nível de utilização dos recursos, definir a probabilidade de ocorrência e o impacto de determinados factores de risco, permite uma análise de correlação de durações, verificação da contingência necessária para diminuir as probabilidades de risco, análise de sensibilidade, entre outros. Na figura 14 são visíveis os três cenários da análise PERT (optimista, mais provável e pessimista) bem como o gráfico de Gantt.

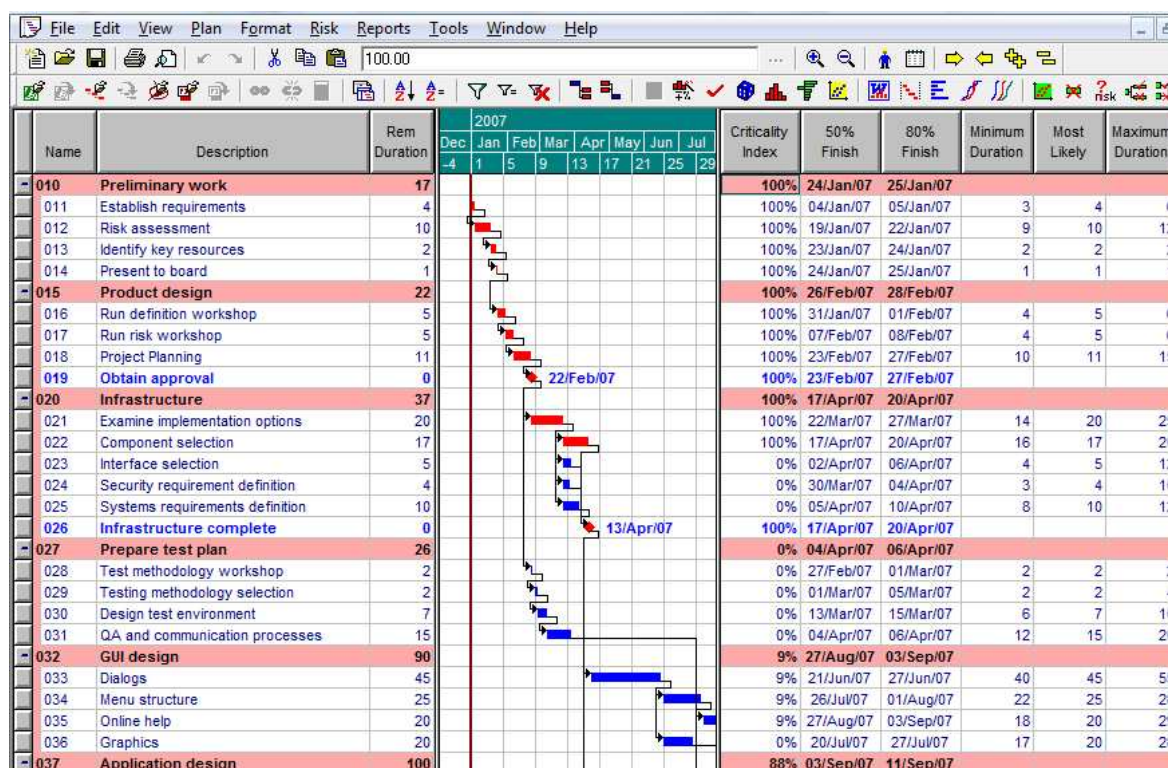


Figura 14 Visão do Primavera PertMaster

É uma ferramenta bastante similar ao MS Project, pois também permite a gestão multi-projecto e a análise do risco. De facto, existe interoperabilidade entre os ficheiros de ambos e possibilidade de ambos os softwares trabalharem de forma integrada (em vez do @ Risk ou o Risk+ o Microsoft Project pode utilizar o PertMaster para fazer as análises de risco). É no tocante ao risco que o PertMaster supera o MS Project porque não está dependente de um *add-in* externo para fazer a análise de risco.



Na análise de risco quantitativa utiliza a análise Monte Carlo para simular os cenários possíveis e possibilita diversas opções para as curvas de distribuição de probabilidade. Na análise de risco qualitativa faz uso da matriz de probabilidade e impacto.

Possui uma interface gráfica desenvolvida e concebe histogramas, tabelas e curvas e gera relatórios de actividades, de recursos e de custos de forma bastante inteligível.

Como se constata é dos softwares mais completos e competitivos existentes no mercado.

Resumindo, o software PertMaster permite aumentar os níveis de confiança no correcto desenrolar e concluir do projecto, utilizando ferramentas que possibilitam a minimização da probabilidade e do impacto de diversos factores de risco através da mitigação e prevenção de factores de risco [55].

### 3.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES DE ANÁLISE DE RISCO EM GESTÃO DE PROJECTOS

Naturalmente, e tal já foi abordado, o MS Project 2007 e o Primavera PertMaster são os softwares mais utilizados e os mais robustos pois possuem ferramentas que têm em conta diversos pormenores que outros aplicativos não levam em conta. Ainda assim, é bom realçar que todos os softwares apresentados podem ser viáveis dependendo do projecto a abordar, do investimento que o gestor de projecto esteja disposto a fazer e do rigor exigido pelo mesmo gestor.

Apesar de serem semelhantes e apresentarem muitas características em comum existem ligeiras diferenças entre ambos na forma de se conseguir analisar o risco (ver tabela 3).

**Tabela 3 Comparação de algumas características entre softwares de escalonamento e risco**

Comparação	Características					
	Multi-Projecto	Open Source	Gestão de Recursos	Gestão de Custos	Trabalha com Grandes Projectos	Análise de Risco
Microsoft Project 2007	x		x	x	x	através de um outro aplicativo
Primavera PertMaster	x		x	x	x	x

Ainda assim, nenhum dos softwares apresentados indica de forma clara que um determinado escalonamento é melhor que outro porque apresenta um nível de risco mais reduzido. É isso que se pretende fazer com este trabalho, a clara indicação do nível de risco de diferentes escalonamentos, para que o agente de decisão possa optar entre diferentes escalonamentos (ou soluções) não dominados, ou seja, soluções que não sejam sempre

melhores ou piores em todos os factores (duração, nível de recursos) comparativamente com as outras alternativas.

## 4. ABORDAGEM PROPOSTA

### 4.1. PROCEDIMENTO

As ferramentas de escalonamento de actividades podem fornecer soluções diferentes, de acordo com o critério de escalonamento seleccionado. Cada solução pode no entanto apresentar níveis de risco distintos, que importa avaliar. O trabalho aqui proposto visa analisar e avaliar o nível de risco presente numa solução de um problema de escalonamento de actividades. Para um gestor de projectos é uma mais valia poder contar com uma ferramenta que aborde o conceito de risco presente em actividades e que o auxilie na tomada de decisão.

Para iniciar a análise de risco é necessário saber qual é o tipo de problema que se pretende abordar. Portanto, é preciso contabilizar os projectos existentes e as actividades de cada um deles e conhecer os tipos de recursos que possam ser utilizados. Para cada actividade é necessário saber os modos de processamento existentes e quais as actividades predecessoras e sucessoras. Para cada modo de processamento tem de existir um recurso e uma duração associada. A par da determinação dos dados do(s) projecto(s) devem definir-se o(s) objectivo(s) que se pretende(m) atingir. Reunindo os dados que descrevem o problema, é feito o escalonamento de actividades, usando as técnicas de optimização disponíveis. Neste trabalho foi usado o escalonador Izaro Grey na obtenção de soluções. Este escalonador foi desenvolvido através de um consórcio entre a empresa Softi9 [56] e o

INESC Porto [57]. O produto apresenta um algoritmo que permite escalonar um grande número de operações num curto espaço de tempo e, para além disso, otimizar cenários produtivos baseando-se em vários critérios de optimização.

No sequenciamento das actividades este escalonador ordena as actividades numa certa ordem de modo a corresponderem aos objectivos do gestor de projectos. Os critérios de optimização a considerar podem ser [58]:

- Minimizar Tempo de Preparação;
- Minimizar Tempo de Espera;
- Minimizar Entregas Fora do Prazo (Atraso Médio);
- Maximizar o Nível de Carga;
- Minimizar o Maior Atraso;
- Minimizar o Desvio em Relação a Datas de Entrega;
- Maximizar Satisfação das Prioridades;

No Izaro Grey para o gestor de projectos conseguir o escalonamento desejado tem de definir qual ou quais as regras de ordenação que prefere. Pode escolher entre [58]:

- EDD (Earliest Due Date): por datas de entrega;
- SPT (Shortest Processing Time): pelo tempo de produção, do menor para o maior;
- LPT (Longest Processing Time): pelo tempo de produção, do maior para o menor;
- PCO (Preferred Customer Order): prioridade da ordem;
- Algoritmos Jackson, Johnson, ...;
- Regras para minimizar Tempos de Preparação;
- Regras para maximizar a ocupação de Recursos;

Este escalonador lê os dados do problema através de um ficheiro XML (*eXtensible Markup Language*), processa-os e fornece o resultado também num ficheiro XML. O XML é uma linguagem que utiliza marcadores (ou campos, em inglês *tags*) e é muito parecida com a linguagem HTML. O XML não tem marcadores definidos como o HTML, mas podem-se definir os marcadores que serão utilizados. Os marcadores que são criados descrevem o conteúdo dos dados inseridos [59].

O documento XML é exactamente como uma estrutura em árvore, todos os ramos criados devem ter um marcador inicial e final e todos têm de estar contidos numa raiz principal. Um exemplo pode ser visto na figura 15.

Com XML os dados são armazenados como arquivos texto e deste modo tem-se um ficheiro de dados independente do software ou hardware que se use para partilhar dados. Normalmente os softwares comerciais que fazem sequenciamento de actividades têm a funcionalidade de comportar este tipo de ficheiro para importar e exportar dados [59].

```
<aluno>
  <nome> Tiago Vaz </nome>
  <número> 1040176 </número>
</aluno>
```

**Figura 15 Exemplo de dados XML**

O Izaro Grey, de acordo com o(s) objectivo(s) do(s) projecto(s), pode considerar diversos cenários com diferentes regras de escalonamento para o mesmo problema.

O sequenciamento vai mostrar quais as folgas presentes em cada actividade, quais os recursos utilizados (e em que períodos de tempo), a duração e custo do projecto. Cabe ao agente de decisão seleccionar qual o escalonamento a ser seguido. De qualquer modo, se existirem diversos sequenciamentos nem sempre é claro qual é o que apresenta os melhores resultados, especialmente se se tratar de um problema multi-objectivo.

Neste trabalho propõem-se que a medida de risco (aqui definida) seja também um factor a considerar na escolha da solução a adoptar.

#### 4.1.1. CÁLCULO DO NÍVEL DE RISCO DOS PROJECTOS

Normalmente, utiliza-se a matriz probabilidade/impacto para representar o risco em cada actividade.

Para auxiliar o agente de decisão na escolha do cronograma adequado, neste trabalho é proposta uma função que avalia o risco presente em soluções de escalonamento de actividades. Essa função tem em conta a presença do risco em cada actividade e a folga associada.

Para medir o risco presente nas actividades é estimada a contribuição dos factores de risco em cada uma delas. Cada actividade pode possuir mais do que um factor de risco, cada qual com suas probabilidades e impactos. Os diferentes valores são agregados num único valor a que se deu o nome de índice de criticidade. Quanto maior for este valor maior o risco associado à actividade.

Caso um factor de risco venha a ocorrer vai pôr em risco a conclusão da actividade nos termos definidos no cronograma. A actividade vai-se alongar no tempo podendo ou não influir na duração do projecto. Caso exista uma folga associada à duração da actividade pode conseguir evitar-se que as actividades sucessoras sejam atrasadas no tempo. Enquanto o índice de criticidade eleva o nível de risco numa actividade, a folga presente na mesma anula ou mitiga o seu efeito na actividade e, consequentemente, no projecto e no escalamento.

Com base no exposto é proposta a seguinte função de avaliação do nível de risco em cada actividade:

$$\sigma_i = \begin{cases} \rho_i \left(1 - \frac{F_i}{D_i}\right), & \text{se } F_i \leq D_i \\ 0, & \text{se } F_i > D_i \end{cases} \quad (1)$$

Em (1) o nível de risco de cada actividade é representado por  $\sigma$ , o índice de criticidade em cada actividade é representado por  $\rho$ ,  $F_i$  é a folga da actividade e  $D_i$  a duração da mesma.

Atente-se que a folga atribuída pelo escalonador a cada actividade leva em conta a utilização dos recursos por parte de todas as actividades. Assim, indirectamente, o nível de utilização de recursos está presente na função do nível de risco.

O nível de risco nas actividades vai variar entre zero e o valor máximo considerado para a matriz de probabilidade/impacto. Assim sendo, o nível de risco das actividades pode ser interligado com a dita matriz, e os seus valores (índices de criticidade -  $\rho$ ) podem variar entre a “zona verde” e a “zona vermelha”. Considere-se a figura 16 e a função descrita em (1). Se, por exemplo, a folga de uma determinada actividade for superior à duração da mesma, segundo a função de avaliação do nível de risco presente em (1), o nível de risco da actividade será nulo independentemente do índice de criticidade considerado. Caso não exista folga, ainda segundo (1), o nível de risco terá o mesmo valor que o índice de criticidade considerado. No pior caso, para a matriz probabilidade/impacto considerada neste caso, o nível de risco na actividade será 80.

		IMPACTO					
		1	2	4	8	16	
PROBABILIDADE	90%	5	5	10	20	40	80
	70%	4	4	8	16	32	64
	50%	3	3	6	12	24	48
	30%	2	2	4	8	16	32
	10%	1	1	2	4	8	16

**Figura 16 Matriz probabilidade/impacto**

Até ao momento só o nível de risco nas actividades foi abordado. Para o cálculo do nível de risco no escalonamento, propõe-se duas alternativas:

- 1) Através de médias aritméticas
- 2) Através de regras de combinações de resultados

#### **1) Nível de risco no escalonamento por médias aritméticas**

O cálculo do nível de risco no escalonamento por médias aritméticas considera a tolerância ao risco do agente de decisão. Para isso são associados pesos às zonas de criticidade, de certa forma reflectindo a importância relativa dada pelo decisor a cada área. Por exemplo, o utilizador pode considerar que um nível de risco nas actividades de risco baixo ou médio

têm a mesma importância mas que uma actividade com um nível de risco alto influi duplamente no risco do projecto. Se assim for, pode indicar que o nível de risco médio tem um peso igual ao baixo e que o nível de risco alto tem um peso 2 vezes superior ao baixo. Segundo o cálculo considerado, esta posição do utilizador duplica a importância do número de actividades com risco alto. A fórmula proposta é a seguinte:

$$\sigma_{esc} = \frac{peso_{baixo} * valor_{baixo} + peso_{médio} * valor_{médio} + peso_{alto} * valor_{alto}}{n^{\circ} de actividades} \quad (2)$$

O peso de cada zona de criticidade é multiplicado pelo número de actividades da mesma zona.

Em (2)  $\sigma_{esc}$  representa o nível de risco do escalonamento, o  $valor_{baixo}$  representa o número de actividades com nível de risco baixo. O mesmo se passa com  $valor_{médio}$  e  $valor_{alto}$ .

O valor de  $peso_{baixo}$  é, neste trabalho, considerado unitário e os  $peso_{médio}$  e  $peso_{alto}$  representam os pesos introduzidos pelo utilizador em relação ao valor do  $peso_{baixo}$ .

O  $n^{\circ} de actividades$  é a soma das actividades existentes em cada escalonamento.

## 2) Nível de risco no escalonamento usando regras de combinações de resultados

No cálculo do nível de risco no escalonamento por regras de combinações de resultados não se consideram médias ou pesos, mas sim um conjunto de regras empíricas que definem o nível de risco que deverá ser associado ao escalonamento. Essas regras são definidas pelo utilizador e não se baseiam nos valores dos níveis de risco das actividades mas na posição que ocupam nas zonas de criticidade (baixa, média ou elevada). Por exemplo:

- O nível de risco do projecto será baixo se 4/5 das actividades apresentarem um nível de risco baixo
- O nível de risco do projecto será alto se mais de 1/5 das actividades apresentarem um nível de risco alto
- Todas as outras combinações de níveis de risco das actividades originam um nível de risco do projecto médio.



Mais uma vez, a reacção do agente de decisão perante o risco está reflectida neste processo de classificação.

Seja qual for a forma de cálculo considerada, o agente de decisão já possui um meio de comparar o risco nos escalonamentos. Através da comparação entre os níveis de risco dos escalonamentos disponíveis pode optar por um determinado cronograma ou então, pode reescalonar, modificando alguns dos pressupostos anteriormente considerados (por exemplo, os valores dos índices de criticidade considerados).

#### 4.2. IMPLEMENTAÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA

Para facilitar os cálculos associados ao nível de risco foi implementado um conjunto de macros desenvolvidas em *Visual Basic* (VB). Os passos necessários para o cálculo do nível de risco de uma solução são os apresentados na figura 17. Começa-se por se criar um ficheiro XML contendo a descrição do problema. Esse ficheiro serve de *input* ao Izaro Grey. O escalonador vai gerar um novo ficheiro XML que contém dados que vão ser utilizados no cálculo da duração e da folga de cada actividade. De seguida, pede-se ao utilizador para seleccionar um valor da matriz probabilidade/impacto que corresponda ao índice de criticidade de cada actividade. Por fim, aplica-se a função de cálculo do nível de risco.

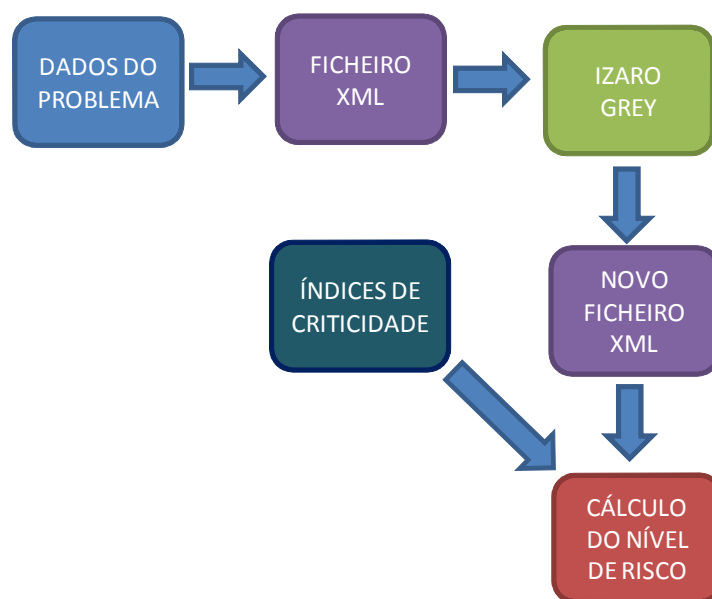
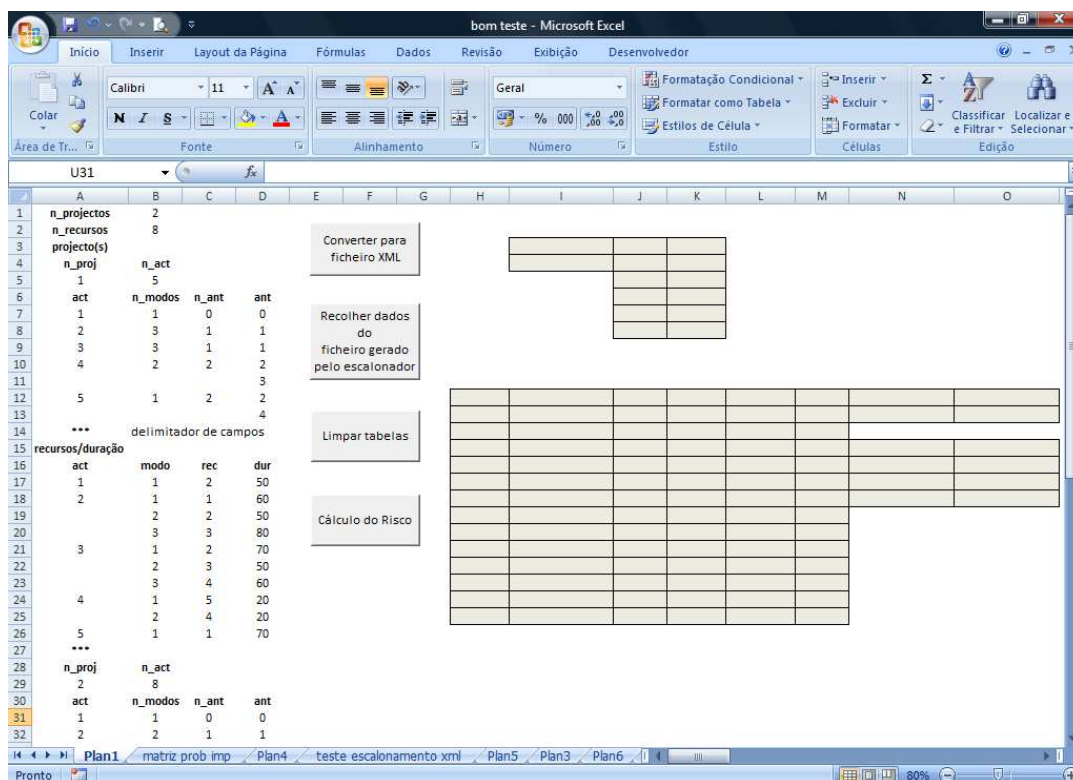


Figura 17 Passos para o cálculo do nível de risco

O *layout* da folha da interface criada é apresentado na figura 18. No lado esquerdo da folha Excel são inseridos os dados relativos ao problema (descrição dos projectos). Entre campos estão presentes os caracteres “\*\*\*”. Estes caracteres servem de delimitadores entre campos no tratamento de dados pelo código que os processará.



**Figura 18 Layout do ficheiro Excel**

Para se converter os dados de entrada para um ficheiro XML basta premir o botão “Converter para ficheiro XML”. O botão actua o código VB que por sua vez pede ao utilizador para indicar o nome do ficheiro que receberá os dados processados.

Depois de gerado, o ficheiro XML é introduzido no escalonador Izaro Grey que sequencia as actividades de acordo com o critério de optimização seleccionado pelo utilizador.

O resultado é apresentado num ficheiro XML com uma solução de escalonamento para cada critério de optimização seleccionado.

Para se conseguir extrair a informação de cada ficheiro XML para o Excel deve-se pressionar o botão “Recolher dados do ficheiro gerado pelo escalonador”. Esse programa pede ao utilizador para indicar a localização de cada ficheiro XML e extrai a informação nele contida. Essa informação é trabalhada para que permita a impressão do caminho

crítico de cada projecto bem como a folga e a duração presente nas actividades de cada projecto.

Existe ainda um botão denominado “Limpar tabelas” que limpa toda a folha Excel com excepção dos dados de entrada. Este botão foi criado para que novos dados só fossem introduzidos em folhas limpas.

Por fim, através do botão “Cálculo do Risco”, presente na folha Excel, activa-se o código que permite determinar o valor do nível de risco ( $\sigma$ ) em cada uma das actividades.

O código desenvolvido relativo à implementação acima descrita será facultado pelo autor a quem o pretender.

#### 4.3. EXEMPLIFICAÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA

Para melhor ilustrar a proposta aqui apresentada mostra-se de seguida um pequeno exemplo. Tal exemplo considera dois projectos distintos com actividades próprias que concorrem pelos mesmos recursos (ver figuras 19 e 20).

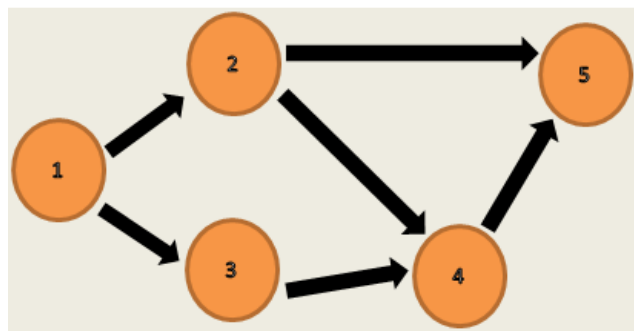


Figura 19 Grafo do projecto 1

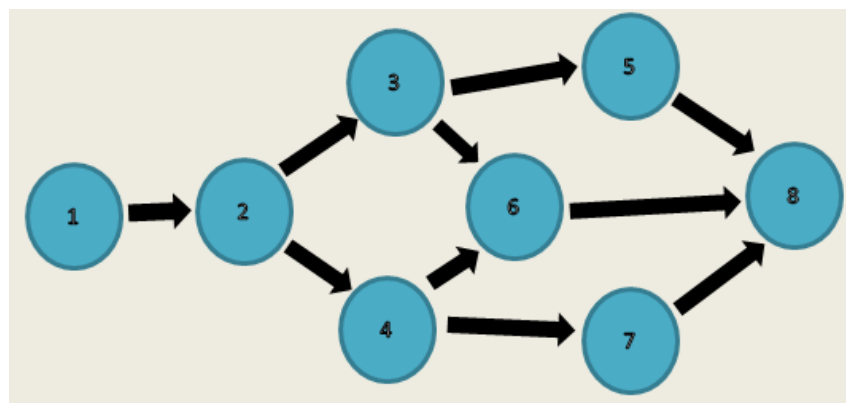


Figura 20 Grafo do projecto 2

Os recursos que as actividades de ambos os projectos consomem bem como os possíveis modos de execução são explicitados na tabela 4.

Para cada actividade existe pelo menos um modo de execução. Para cada modo existem recursos e durações associadas. Considera-se, portanto, que cada actividade pode ser realizada em modos alternativos o que provoca diferentes consumos de recursos. O problema apresentado como exemplo é considerado não preemptivo e todos os recursos são considerados renováveis. Note-se que estes problemas têm diversos modos de execução e que muitas actividades concorrem pelos mesmos recursos. Trata-se, portanto, de um problema MRCMPSP.

**Tabela 4 Dados dos projectos**

PROJECTO 1				PROJECTO 2					
ACTIVIDADE	MODO	RECURSO	DURAÇÃO	ACTIVIDADE	MODO	RECURSO	DURAÇÃO		
1	1	2	50	1	1	4	50		
2	1	1	60	2	1	5	40		
	2	2	50		2	6	70		
	3	3	80	3	1	3	40		
3	1	2	70		2	7	120		
	2	3	50	4	1	1	50		
	3	4	60		2	6	40		
4	1	5	20		3	8	120		
	2	4	20	5	1	4	40		
5	1	1	70		2	5	40		
					3	7	70		
				6	1	3	90		
					2	8	60		
				7	1	2	50		
					2	3	40		
				8	1	6	80		
					2	4	100		

Para o exemplo presente geraram-se dois escalonamentos distintos. No primeiro escalonamento seleccionou-se como critério de optimização a minimização do atraso

médio e como critério de desempate o tempo de execução das operações (será referido neste texto por escalonamento A). No segundo escalonamento aplicou-se a minimização do maior atraso e como critério de desempate a prioridade entre projectos (será referido neste texto por escalonamento B).

Os diagramas de Gantt de ambos os escalonamentos estão representados na figura 21.

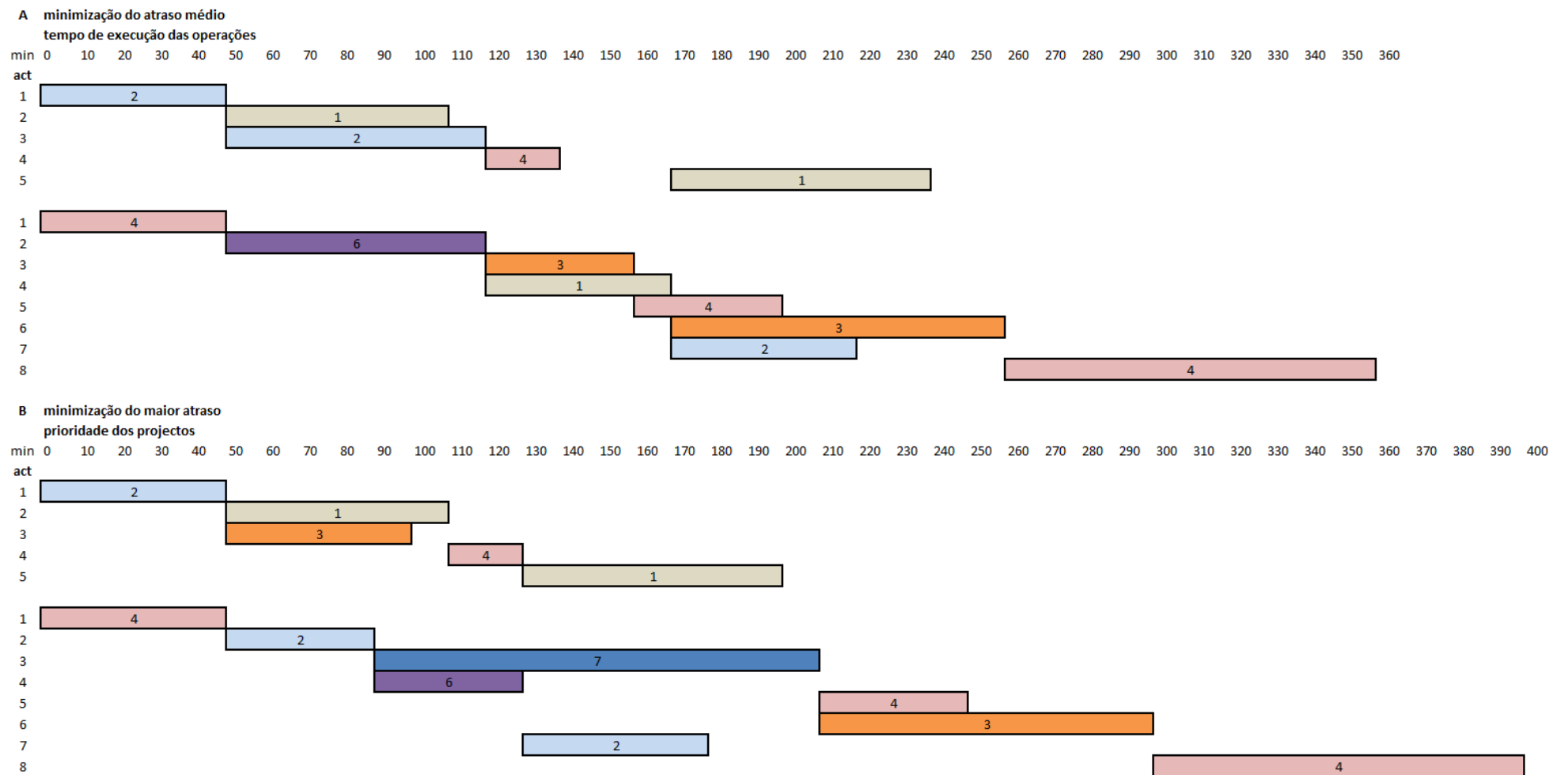


Figura 21 Diagramas de Gantt

Na figura 22 estão presentes os resultados dos escalonamentos A e B.

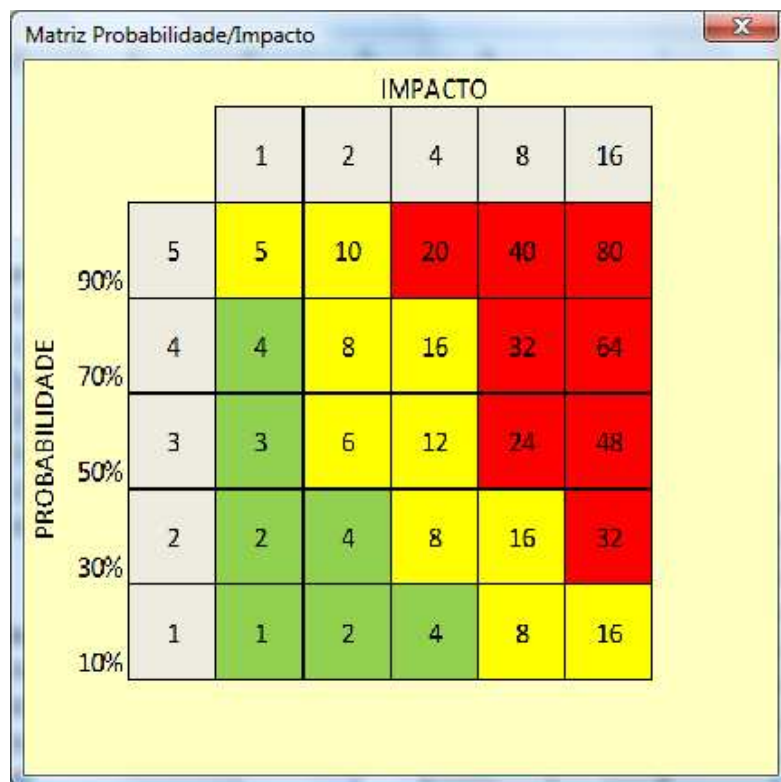
ESCALONAMENTO A					ESCALONAMENTO B				
	PROJECTO	1	2			PROJECTO	1	2	
	CAMINHO CRÍTICO	1	1			CAMINHO CRÍTICO	1	1	
		3	2				3	2	
		4	4				4	4	
		5	7				5	7	
			8					8	
PROJECTO	ACTIVIDADE	FOLGA	DURAÇÃO	p	PROJECTO	ACTIVIDADE	FOLGA	DURAÇÃO	p
1	1	0	50		1	1	0	50	
	2	10	60			2	0	60	
	3	0	70			3	10	50	
	4	30	20			4	0	20	
	5	0	70			5	0	70	
2	1	0	50		2	1	0	50	
	2	0	70			2	0	40	
	3	0	40			3	0	120	
	4	0	50			4	0	40	
	5	60	40			5	50	40	
	6	0	90			6	0	90	
	7	40	50			7	100	50	
	8	0	100			8	0	100	

**Figura 22 Resultados do escalonamento A e B**

Uma vez obtidas as folgas e durações de cada actividade, para se poder calcular o nível de risco ( $\sigma$ ) em cada actividade falta apenas introduzir o índice de criticidade ( $\rho$ ) de cada uma, na coluna respectiva (coluna vazia na figura 22).

Para auxiliar o utilizador a introduzir os valores dos índices de criticidade é apresentada uma janela com a imagem da matriz probabilidade/impacto (ver figura 23). Esta matriz é meramente indicativa podendo o utilizador usar a escala de valores que bem desejar. Claro está que os resultados aparecerão em conformidade com a escala utilizada.

O valor do índice de criticidade indica o grau de exposição ao risco de cada actividade e é uma demonstração representativa dos factores de risco que cada actividade contém. Tais índices deverão ser os mesmos quer para o escalonamento A quer para o B.



**Figura 23** Janela da matriz probabilidade/impacto

A título de exemplo consideram-se para todos os escalonamentos os índices de criticidade presentes na figura 24:

PROJECTO	ACTIVIDADE	$\rho$
1	1	16
	2	4
	3	5
	4	12
	5	40
2	1	12
	2	5
	3	16
	4	40
	5	4
	6	12
	7	32
	8	12

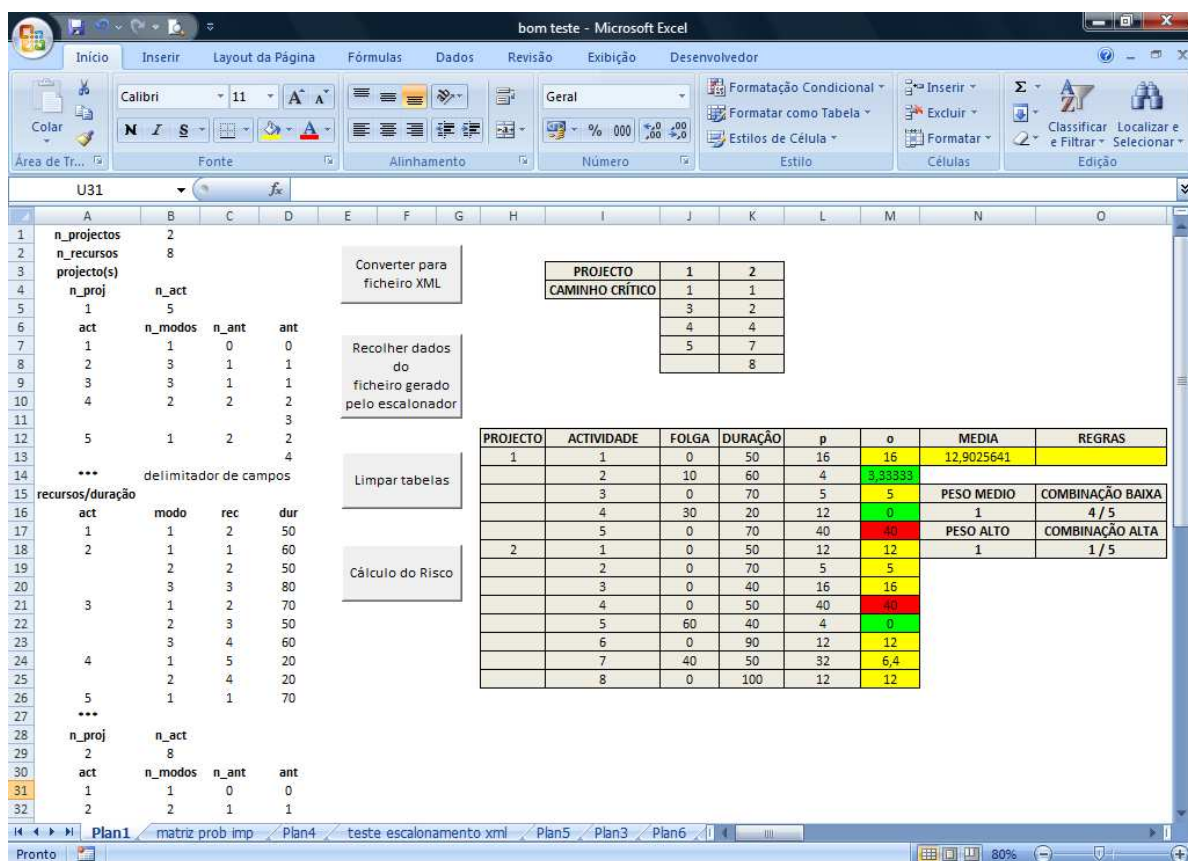
**Figura 24** Índices de criticidade considerados

Quer se opte por considerar o cálculo através de médias, ou por regras de combinações de resultados, ambos são representados na folha Excel junto à tabela que apresenta as folgas nas actividades.



Com os índices considerados já introduzidos, é pedido ao utilizador que introduza o peso do nível de risco médio e alto em relação ao nível de risco baixo.

A título de exemplo, a figura 25 apresenta os níveis de risco obtidos nas actividades e no escalonamento A, bem como os pesos e regras considerados.



**Figura 25** Layout do ficheiro Excel após o cálculo dos níveis de risco

Na tabela 5 apresentam-se os resultados obtidos para diferentes valores de pesos dos níveis de risco médio e alto em relação ao baixo.

**Tabela 5** Níveis de risco dos escalonamentos com diferentes pesos

MÉDIO	ALTO	ESC A	ESC B
1	1	12,90	13,31
1	2	19,06	20,08
2	2	25,55	26,62
1	1/2	9,83	9,92
1/2	1/2	6,58	6,65

Um agente de decisão neutro em relação ao risco, considera que os pesos para todos os níveis de risco nas actividades apresentam o mesmo valor, o que resultaria num nível de risco médio dos escalonamentos. Um agente de decisão avesso ao risco consideraria o cenário presente na segunda e terceira linha da tabela 5. Naturalmente, o nível de risco médio e/ou alto presente em cada actividade é tido em maior consideração do que o nível de risco baixo, o que faz com que o nível de risco dos escalonamentos seja considerado alto. Por fim, um agente de decisão propenso ao risco daria menos importância às actividades com níveis de risco altos e porventura médios, sendo que o resultado indicaria, ainda assim, um nível de risco médio para os escalonamentos.

Com diferentes regras de combinações de resultados, os escalonamentos têm níveis de risco diferentes, dependendo uma vez mais da tolerância ao risco por parte do gestor de projecto. Veja-se a tabela 6.

**Tabela 6 Níveis de risco dos escalonamentos com diferentes combinações de resultados**

BAIXO	ALTO	ESC A	ESC B
1/5	4/5		
2/5	3/5		
3/5	2/5		
4/5	1/5		

Na primeira linha da tabela 6 considera-se que para o nível de risco do escalonamento ser considerado baixo é necessário que pelo menos 1/5 das actividades tenham um nível de risco baixo, para o nível de risco do escalonamento ser considerado alto é necessário que pelo menos 4/5 das actividades tenham um nível de risco alto. Qualquer outra combinação indica que o escalonamento tem um nível de risco médio.

Portanto, as primeiras linhas da tabela indicam que o agente de decisão é propenso ao risco, enquanto que as últimas linhas revelam que é avesso, ou mesmo neutro.

Para finalizar, ainda para o exemplo proposto, considere-se um agente de decisão neutro em relação ao risco. Os seus pressupostos são os seguintes:

No cálculo através de médias aritméticas considera pesos iguais para todos os níveis de risco das actividades. No cálculo através de regras de combinações de resultados determina que:

- O nível de risco do projecto será baixo se 4/5 das actividades apresentarem um nível de risco baixo
- O nível de risco do projecto será alto se mais de 1/5 das actividades apresentarem um nível de risco alto
- Todas as outras combinações de níveis de risco das actividades originam um nível de risco do projecto médio.

Os resultados obtidos através de tais regras estão presentes na figura 26.

Escalonamento A		Escalonamento B	
media	regras	media	regras
12,84615		13,30769	

**Figura 26 Níveis de risco dos projectos em ambos os escalonamentos**

O escalonamento B tem um nível de risco maior do que o escalonamento A, segundo o critério de cálculo do nível de risco por regras de combinações de resultados. Isto deve-se ao facto de existirem mais actividades com folga no escalonamento A e de alguns índices de criticidade influírem em actividades com folga no escalonamento A e sem folga no B.



## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho aqui apresentado versou a análise de risco em problemas de escalonamento com restrições de recursos. Foi feita uma revisão da literatura, quer para o problema em causa e suas variantes, quer para a avaliação do risco nesses problemas. Verificou-se, por um lado, que os problemas multi-projecto têm sido alvo de menor atenção e que a análise do risco em problemas deste tipo está ainda pouco explorada.

As principais conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros são apresentadas nas secções seguintes.

### 5.1. CONCLUSÕES

O trabalho realizou-se em torno dos problemas de sequenciamento de projectos com recursos limitados (conhecido na literatura por *Resource Constrained Project Scheduling Problem - RCPSP*). Estes problemas são de difícil tratamento (NP-difíceis), razão pela qual os algoritmos de resolução exacta não são eficientes na resolução de problemas de dimensão real. No entanto, existem algumas abordagens propostas baseadas nesses

algoritmos. Mostrou-se que os trabalham à base de partições do espaço de soluções e sucessivas avaliações da optimalidade das soluções encontradas. Em problemas de maior dimensão são usados algoritmos heurísticos. Os algoritmos heurísticos nem sempre produzem soluções óptimas mas requerem tempos de computação bastante inferiores aos algoritmos exactos. Neste campo, destacam-se os algoritmos construtivos e as meta-heurísticas (como os algoritmos genéticos e o GRASP, por exemplo).

Sendo o objectivo principal do trabalho possibilitar a análise de risco em escalonamentos de projectos foi feita uma proposta de avaliação do nível de risco dos projectos. Para automatizar todo o processo criaram-se diversas macros que permitiram converter os dados numéricos do problema, introduzidos pelo utilizador, para linguagem XML. Só através do ficheiro de dados em formato XML é possível ao escalonador Izaro Grey analisar e obter os escalonamentos das actividades dos projectos propostos. Para tal o escalonador faz uso de regras de construção de soluções como a minimização do atraso médio e a minimização do maior atraso. Pela análise das soluções de escalonamento construídas foi possível examinar de que forma o risco está presente nos projectos.

Foi proposta uma função matemática de cálculo de risco presente em cada escalonamento obtido. Através desses valores o agente de decisão obtém mais um indicador sobre qual o modelo de sequenciamento de actividades que deve escolher. Essa função calcula o nível de risco presente em cada actividade através de um índice de criticidade associado a cada uma delas (obtido através da matriz probabilidade/impacto e tendo em conta a probabilidade de ocorrência e o impacto que os factores de risco de cada actividade apresentem) e das folgas que cada actividade apresenta.

Essa função apresenta duas soluções para o mesmo escalonamento. Uma solução através de médias aritméticas dos níveis de risco de cada actividade e outra através de regras de combinações de resultados, que apresenta ao utilizador não um resultado numérico mas sim gráfico. A cor (verde, amarelo ou vermelho) indica um diferente nível de risco e é baseada nas cores da matriz probabilidade/impacto.

Com estes resultados foram atingidos os objectivos propostos na realização do trabalho.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Através do trabalho desenvolvido abrem-se perspectivas de possíveis desenvolvimentos futuros. Foram consideradas duas formas de cálculo de soluções, uma através de médias aritméticas dos níveis de risco de cada actividade e outra através de regras de combinações de resultados. Certamente é possível criar um outro modo de calcular o nível de risco nos escalonamentos como considerar o nível de risco do projecto com base na maioria dos níveis de risco presente nas actividades. Por exemplo, se a maioria das actividades apresentar um nível de risco baixo significa que o nível de risco do projecto é baixo.

É também possível complementar o trabalho criando novas maneiras de interagir com o utilizador ao nível da introdução dos factores de risco. No modelo proposto o utilizador é convidado a calcular o índice de criticidade e seguidamente a introduzir um valor presente na matriz probabilidade/impacto que represente a ameaça dos factores de risco sob a actividade em questão. Por ventura podem-se armazenar todos os factores de risco associados aos projectos, atribuí-los às actividades respectivas e apresentar uma janela que armazene os dados inseridos, nomeadamente os valores correspondentes à probabilidade de ocorrência e impacto dos factores de risco em cada actividade. Se tal for feito consegue-se proporcionar a interacção entre o utilizador e o programa e evita-se que os cálculos sejam exclusivamente feitos pelo utilizador.

Neste trabalho optou-se por considerar as folgas existentes entre actividades sucessivas como um factor a estar presente na função de cálculo do nível de risco nos projectos. Uma alternativa ou complemento a este trabalho pode ser examinar as folgas existentes entre a utilização de recursos renováveis, ou seja, considerar como folga o período em que tais recursos não estão a ser utilizados. Esta medição pode potenciar a racionalização da utilização dos recursos.





## *Referências Documentais*

- [1] **Blazewicz, J., Lenstra, J. K. e Rinnooy Kan, A. H. G.** Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*. 1983, 5, pp. 11-24.
- [2] **PMI, Project Management Institute.** *Project Management Body of Knowledge*. 3ª edição. 2004.
- [3] **Wiley, V. D., Deckro, R. F. e Jackson Jr., J. A.** Optimization analysis for design and planning of multi-project programs. *European Journal of Operational Research*. 1998, 107, pp. 492-506.
- [4] **Santos, Pedro.** Triângulo do Projecto. [Online] <http://www.psantos.org/tri-ngulo-do-projecto/>. Maio 2009.
- [5] **Varela, J. M.** [Online] [http://tsc.unex.es/~tabo/PY/PY\\_tema4\\_2h.pdf](http://tsc.unex.es/~tabo/PY/PY_tema4_2h.pdf). Maio de 2009.
- [6] **Mendes, J. M.** Uma metaheurística para a programação de projectos com multi-modos e recursos limitados. *IJIE – Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. 2009, 1, pp. 88-105.
- [7] **Demeulemeester, E. L. e Herroelen, W. S.** An Efficient Optimal Solution Procedure for the Preemptive Resource-Constrained Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*. 1996, 90, pp. 334-348.
- [8] **Lopez Vaca, O. C.** Um Algoritmo Evolutivo para a Programação de Projetos Multi-Modos com Nivelamento de Recursos Limitados. UFSC. Florianópolis, 1995. Tese Doutorado.
- [9] **Ichihara, J. A.** O problema de programação de projectos com restrição de recursos (resource-constrained project scheduling problem). *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. 2002.
- [10] **Yang, B., Geunes, J. e O'Brien, W.** *Resource-Constrained Project Scheduling: Past Work and New Directions*. Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida. 2001.

- [11] **Martins, Sérgio.** Gerenciamento de Projecto: Metaheurísticas para Optimização do Escalonamento de Actividades na Exploração e Produção de Petróleo. Laboratório de Engenharia de Produção, Universidade do Norte Fluminense. 2000.
- [12] **Matos, Manuel.** Introdução à Decomposição de Dantzig-Wolfe. FEUP. 1994.
- [13] **Blazewicz, J., et al.** Handbook on Scheduling. From Theory to Applications. *International Handbook on Information Systems*. 2007, pp. 33-35.
- [14] **AHIMA - Perspectives in Health Information Management.** Managing Multiple Projects: A Literature Review of Setting Priorities and a Pilot Survey of Healthcare Researchers in an Academic Setting. [Online]  
[http://library.ahima.org/xpedio/groups/public/documents/ahima/bok1\\_034169.html](http://library.ahima.org/xpedio/groups/public/documents/ahima/bok1_034169.html).
- [15] **Reis, J.** Uma Introdução ao Scheduling. ISCTE. 1996.
- [16] **Grupo de Controlo e Gestão.** Gestão Industrial. [Online]  
[http://gestao.dem.uc.pt/gestao\\_industrial/mad/Vol4.pdf](http://gestao.dem.uc.pt/gestao_industrial/mad/Vol4.pdf).
- [17] **Tchao, C.** Heurísticas para o Problema de Escalonamento de Projetos com Restrição de Recursos. Universidade Federal Fluminense. 2007.
- [18] **Viana, A.** Técnicas Heurísticas para Apoio à Decisão. ISEP. 2007.
- [19] **Sucupira, I. R.** Métodos Heurísticos Genéticos: Meta-heurísticas e hiper-heurísticas. Universidade de São Paulo. 2004.
- [20] **Range, M. C., Abreu, N. e Boaventura-Netto, P.** GRASP para o PQA: um limite de aceitação para soluções iniciais. [Online]  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382000000100006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382000000100006).  
Julho 2009.
- [21] **Armentano, V. A., Mazzini, R. e Pureza, V. M.** *Meta-Heurísticas Populacionais Aplicadas ao Problema de Programação da Produção em Máquinas Paralelas*. [Online] <http://www.densis.fee.unicamp.br/~franca/tematico/tarefas/tarefa5.html>.
- [22] **Concílio, R.** Contribuições à Solução de Problemas de Escalonamento pela Aplicação Conjunta de Computação Evolutiva e Otimização com Restrições. Universidade Estadual de Campinas. 2000. pp. 31-36.
- [23] **Rei, W., Cordeau, J. F., Gendreau, M., Soriano, P.** Accelerating Benders Decomposition by Local Branching. *Inform Journal On Computing*. 2006 , 21, pp. 333-345.

- [24] **Colak, S., Agarwal, A. e Erenguc, S.** *Resource Constrained Project Scheduling: A Hybrid Neural Approach*. Dept. of Decision and Information Sciences Warrington College of Business Administration, University of Florida. 2006.
- [25] **Mendes, J. J. M. e Gonçalves, J. F.** Um algoritmo genético para o problema do sequenciamento de projectos com recursos limitados. *Investigação Operacional*. 2003, 23, pp. 179-195.
- [26] **Pritsker, A., et al.** Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management Science*. 1969, 16, pp. 93-108.
- [27] **Mohanthly, R. P. e Siddiq, M. K.** Multiple projects multiple resources-constrained scheduling: some studies. *International Journal of Production Research*. 1989, 27 (2), pp. 261–280.
- [28] **Vercellis, C.** Constrained multi-project planning problems: a Lagrangean decomposition approach. *European Journal of Operational Research*. 1994, 78, pp. 267-275.
- [29] **Gonçalves, J. F., Mendes, J. J. M. e Resende, M. G. C.** A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2004, pp. 1173-1175.
- [30] **Browning, T. R. e Yassine, A.** Resource-Constrained Multi-Project Scheduling: Priority Rule Performance Revisited. 2008.
- [31] **Kurtulus, I. S. e Davis, E. W.** Multi-project scheduling: categorization of heuristic rules performance. *Management Science*. 1982, 28, pp. 161–172.
- [32] **Dumond, J. e Mabert, J. A.** Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: An experimental analysis. *Management Science*. 1998, 34 (1), pp. 101-118.
- [33] **Ash, R.** Activity scheduling in the dynamic, multi-project setting: choosing heuristics through deterministic simulation. Phoenix : s.n., 1999. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. pp. 937–941.
- [34] **Lova, A., Maroto, C. e Tormos, P.** A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling. *European Journal of Operational Research*. 2000, 127, pp. 408–424.

- [35] **Kolisch, R. e Hartmann, S.** Experimental Investigation of Heuristics for Resource-Constrained Projects Scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*. 2005, 174, pp. 23-37
- [36] **Baar, T., Brucker, P. e Knust, S.** Tabu-search Algorithms and lower bounds for the resource-constrained project scheduling problem. In: *S.Voss, S. Martello, I.Osman, C. Roucairol (Eds.), Meta-heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*. 1998.
- [37] **Mori, M. e Tseng, C.** A genetic algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 1997, 100, pp. 134-141.
- [38] **Bouleimen, K. e Lecocq, H.** A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2003, 149, pp. 268-281.
- [39] **Hartmann, S.** A competitive genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logisticc*. 1998, 45, pp. 733-750.
- [40] **De Reyck, B. e Herroelen, W.** The multi-mode resource-constrained Project scheduling problem with generalized precedence relations. *European Journal of Operational Research*. 1999, 119, pp. 538-556.
- [41] **Hartmann, S.** Project Scheduling with Multiple Models: A Genetic Algorithm. *Annals of Operation Research*. 2001, 102, pp. 111-135.
- [42] **Kim, K. W., Gen, M. e Yamazaki, G.** Hybrid Genetic Algorithm with Fuzzy Logic for Resource-Constrained Project Scheduling. *Proceedings of the Electronics, Information and Systems Conference*. 2003. pp. 178-188.
- [43] **Valls, V., Quintanilla, S. e Ballestín, F.** Resource-constrained project scheduling: A critical activity reordering heuristic. *European Journal of Operational Research*. 2003, 149 (2), pp. 282-301.
- [44] Multi Project Planner 3.1. [Online] Adaptive Planning Tools. <http://www.adaptive-planning.com/multiprojectplanner.php>. Maio 2009.
- [45] RationalPlan Tutorial. [Online] <http://www.rationalplan.com/tutorial/index.html>. Maio 2009.
- [46] GanttProject Home. [Online] <http://ganttproject.biz/>. Junho 2009.

- [47] **Mühlbauer, R., et al.** *Comparison of Projectmanagement-Software*. Institut für Bioinformatik, Johannes Kepler Universität Linz. 2007.
- [48] **Almeida, E. P.** Técnicas de análise de risco aplicadas ao planeamento e programação de projectos de construção civil. Universidade Federal Fluminense. 2005.
- [49] **Dawood, N.** Estimating project and activity duration: a risk management approach using network analysis. *Constructing Management and Economics*. 1998, 16, pp. 41-48.
- [50] **Hulett, D. T.** Integrated Cost and Schedule Project Risk Analysis. [Online] Hulett & Associates, LLC. [www.projectrisk.com](http://www.projectrisk.com). 2004
- [51] **Valadares Tavares, L., Antunes Ferreira, J. A. e Silva Coelho, J.** On the optimal management of project risk. *European Journal of Operational Research*. 1998, 107, pp. 451-469.
- [52] Risk Analysis. [Online] Palisade.  
<http://www.palisade.com/downloads/pdf/PalisadeBrochure.pdf>. pp. 35 - 36. Junho 2009.
- [53] Features and Benefits. [Online] Deltek Risk+.  
<http://www.deltek.com/products/riskplus/featuresbenefits.asp?benefit=integrate>. Junho 2009.
- [54] **Souza, M.** Quantificação das incertezas na avaliação de projectos. [Online]  
<http://www.gerenciamento.ufba.br/MBA%20Disciplinas%20Arquivos/Viabilidade/Quantifica%C3%A7%C3%A3o%20das%20Incertezas%20na%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20Projetos.pdf>. Julho 2009.
- [55] **Oracle.** Tutorial PertMaster.
- [56] [Online] <http://www.softi9.pt/>. Outubro 2009.
- [57] [Online] <http://www2.inescporto.pt/>. Outubro 2009.
- [58] Gestão da Capacidade Produtiva. [Online]  
[http://www2.egi.ua.pt/cursos\\_2005/files/FG/FG\\_7.pdf](http://www2.egi.ua.pt/cursos_2005/files/FG/FG_7.pdf). Outubro 2009.
- [59] **Jones, C. e Drake, F.** Python & XML. O'Reilly Edition. 2002, pp. 12-53